Leiden, 1959

HET LICHAMELIJK PRESTATIEVERMOGEN VAN CARDIOLOGISCHE PATIËNTEN

LANE LIBRARY. STANFORD UNIVERSITY

B. BINK

Digitized by the Internet Archive
in 2025

https://archive.org/details/hetlichamelijkpr0000vari

HET LICHAMELIJK PRESTATIEVERMOGEN VAN CARDIOLOGISCHE PATIËNTEN

Uit de Afdeling Arbeidsgeneeskunde van het Nederlands Instituut voor Praeventieve Geneeskunde te Leiden. Hoofd Dr. F. H. Bonjer

HET LICHAMELIJK PRESTATIEVERMOGEN VAN CARDIOLOGISCHE PATIËNTEN

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD VAN DOCTOR IN DE GENEESKUNDE AAN DE RIJKSUNIVERSITEIT TE LEIDEN, OP GEZAG VAN DE RECTOR MAGNIFICUS DR H. J. LAM, HOOGLERAAR IN DE FACULTEIT DER WIS- EN NATUURKUNDE, TEGEN DE BEDENKINGEN VAN DE FACULTEIT DER GENEESKUNDE TE VERDEDIGEN OP WOENSDAG 4 FEBRUARI 1959 TE 14.00 UUR

DOOR

BAREND BINK

GEBOREN TE LEIDEN IN 1916

PROMOTOR:

PROF. DR. H. A. SNELLEN

AAN DE NAGEDACHTENIS VAN DR. P. H. VAN DER HOOG

VOORWOORD

De totstandkoming van dit proefschrift is aan veler samenwerking te danken, waarbij in de eerste plaats de goede betrekking tussen de Afdeling Cardiologie van het Academisch Ziekenhuis te Leiden en de Afdeling Arbeidsgeneeskunde van het Nederlands Instituut voor Praeventieve Geneeskunde vermeld dient te worden. Vrijwel alle patiënten, die in dit proefschrift worden besproken, werden ons door de Afdeling Cardiologie gestuurd. De belangstelling van Prof. Dr. H. A. Snellen heb ik steeds als stimulans gevoeld.

Ook binnen het Instituut ben ik velen erkentelijk voor hun belangstelling, hulp en critiek tijdens mijn onderzoek en bij het schrijven van dit proefschrift. Mijn dank geldt in de eerste plaats het Hoofd van de Afdeling Arbeidsgeneeskunde, Dr. F. H. Bonjer, en mijn beide collegae J. W. Snellen en A. C. Bobbert. Grote steun ondervond ik van de statisticus H. de Jonge. De technici J. Bleeker en C. N. van Daalen maakten het onderzoek mogelijk door het ontwerpen en vervaardigen van de benodigde apparatuur. Tenslotte dank ik allen, die op andere wijze aan het tot stand komen van dit proefschrift hebben bijgedragen voor hun zo zeer gewaardeerde hulp, vooral ook Dr. M. E. Wise, die de samenvatting in het Engels vertaalde.

INHOUD

HOOFDSTUK I

Het vaststellen van het lichamelijk prestatievermogen 1

A. Begripsomschrijving en definitie 1
B. Sociale betekenis 2
C. Criteria 2

HOOFDSTUK II

Bespreking der in de literatuur beschreven methoden 4

HOOFDSTUK III

Beschrijving van de functieproef en van de gebruikte apparatuur . . 8

A. Keuze van de arbeidsbelasting 8
B. Het meten der physiologische reacties 9
C. Gebruikte apparatuur 13

HOOFDSTUK IV

Bepaling van het lichamelijk prestatievermogen uit de functieproef 20

A. Beschrijving van de gebruikte criteria 20
1. De ventilatie-prestatie-index 20
2. De arbeidsbelasting bij polsfrequentie 170 21
3. De pols-prestatie-index 23
B. Bespreking van reeds genoemde en andere criteria . . . 27

HOOFDSTUK V

De waarde der gebruikte criteria bij de beoordeling van cardiologische patiënten 38

1. Correlaties tussen de ventilatie-prestatie-index, de perifere longvaatweerstand en de diffusiecapaciteit van de longen . 38
2. Correlaties tussen de pols-prestatie-index en de ostiumgrootte bij patiënten met mitraalstenose en met pulmonaalstenose 41
3. Bloeddrukmetingen en de mate van vernauwing van de aorta bij coarctatio aortae 44
4. Electrocardiografie en haemodynamische bevindingen . . 45
5. De berekende cardiac output tijdens de inspanningsproef . 46

Hoofdstuk VI

Het lichamelijk prestatievermogen bij verschillende cardiologische patiënten gegroepeerd volgens de diagnose 48

Discussie 64

Samenvatting 71

Summary 76

Literatuur 81

Appendix I

Reeks van waarnemingen bij zes proefpersonen, die ieder de functieproef achtmaal verrichtten 85

Appendix II

Reeks van waarnemingen bij vier proefpersonen, die een constante arbeid op de fietsergometer verrichtten met telkens hogere belasting 92

Appendix III

Berekeningsmethode voor de zuurstofdiffusiecapaciteit der longen 95

Symbolen 99

Hoofdstuk I

HET VASTSTELLEN VAN HET LICHAMELIJK PRESTATIE-VERMOGEN

A. *Begripsomschrijving en definitie*

Het aantal met goed gevolg geopereerde hartpatiënten neemt in de laatste jaren sterk toe. De kennis van het lichamelijk prestatievermogen van deze patiënten vóór en na de operatie is van betekenis, niet alleen voor het verscherpen van de indicaties voor zulke operaties, maar ook voor het advies aan de patiënten over hun beroepskeuze of herscholing. Zowel voor het individu als voor de maatschappij is het van groot belang, de geopereerden in een volledig passende werkkring te plaatsen.

Deze overwegingen hebben geleid tot een nauwe samenwerking tussen de afdeling Cardiologie van het Academisch Ziekenhuis te Leiden en de afdeling Arbeidsgeneeskunde van het Nederlands Instituut voor Praeventieve Geneeskunde.

Voor het vaststellen van het lichamelijk prestatievermogen bij hartpatiënten is de kennis van het lichamelijk prestatievermogen van gezonde personen onontbeerlijk. Het vergelijken van patiënten met hun abnormale circulatie met al of niet getrainde proefpersonen heeft er mede toe geleid de physiologische functies, die het lichamelijk prestatievermogen bepalen, nader te bestuderen.

Het *lichamelijk prestatievermogen,* waarvan in deze verhandeling sprake is, kan omschreven worden als de maximale hoeveelheid uitwendige arbeid per tijdseenheid, die het menselijk organisme gedurende een zeker tijdsverloop in staat is te verrichten. De uitwendige arbeid per tijdseenheid (vermogen), die door het organisme geleverd wordt, kan ook als arbeidsbelasting aangeduid worden.

Per definitie kan dus het lichamelijk prestatievermogen van iemand gemeten worden aan de maximale arbeid, die hij gedurende een bepaalde tijd verrichten kan. Deze maximale arbeidsbelasting is bij een normaal functionnerend bewegingsapparaat afhankelijk van de mogelijkheid zuurstof uit de lucht naar de spieren te brengen. De maximale zuurstofopname per minuut is derhalve een graadmeter voor het lichamelijk prestatievermogen (Åstrand (1952)).

Evident is de betekenis van het intact zijn van het bewegingsapparaat. De personen, van wie het lichamelijk prestatievermogen in deze verhandeling beschreven wordt, hadden wat dit betreft geen afwijkingen. Evenmin

werden personen met chronische afwijkingen van inwendige organen, die niet rechtstreeks een functie hebben bij het zuurstoftransport van de longen naar de spieren, in onze beschouwingen betrokken.

Bij bepaalde aandoeningen is de mogelijkheid tot het verrichten van een normale hoeveelheid arbeid per tijdseenheid verminderd, zonder dat dit gepaard gaat met een verminderde mogelijkheid om zuurstof op te nemen en te transporteren.

Naast deze zijn er nog vele factoren, die invloed hebben op het lichamelijk prestatievermogen, die niet onderzocht werden. Zo worden bijvoorbeeld de invloed van klimaatfactoren en van een afwijkende zuurstofspanning in de inademingslucht niet ter sprake gebracht, evenmin als de psychische componenten, die een rol spelen bij het verrichten van een inspanningsproef.

B. *Sociale betekenis*

Naast de betekenis die de bepaling van het lichamelijk prestatievermogen heeft voor de operatieve therapie en het verantwoord plaatsen in de maatschappij van hartpatiënten, lijkt de bepaling ook nuttig voor de bedrijfsgeneeskunde, de sportgeneeskunde en de militaire geneeskunde. In de bedrijfsgeneeskunde kan zij van nut zijn bij de selectie van personeel, vooral voor zware lichamelijke arbeid, of bij het beoordelen van de noodzaak van overplaatsing van oudere arbeiders naar lichter werk. In de sport- en militaire geneeskunde zal een objectieve maat verkregen kunnen worden voor de trainingstoestand, waarbij de conditie van het „zuurstoftransportsysteem" een zo belangrijke rol speelt.

In vele gevallen wenst men, om het algemeen te stellen, een objectieve beoordeling van de arbeidsgeschiktheid met het doel iedere tot werken in staat zijnde mens te brengen op de plaats, waar hij naar zijn vermogen volwaardige arbeid kan verrichten. Doch ook voor het op een juiste wijze ten uitvoer leggen van de sociale verzekeringswetten kan het bepalen van het lichamelijk prestatievermogen van belang zijn (Bonjer (1956)). De meting van het lichamelijk prestatievermogen zal in de toekomst een belangrijk hulpmiddel kunnen blijken te zijn, wanneer naar Amerikaans voorbeeld ook hier te lande „Work Classification Units" zouden worden ingericht, waarin orgaanspecialist, revalidatiearts, bedrijfsarts, psycholoog, deskundige op het gebied van de beroepskeuze en maatschappelijk werker samenwerken ten behoeve van een juiste plaatsing van hart- en longpatiënten.

C. *Criteria*

Ook voor het lichamelijk prestatievermogen geldt, dat de sterkte van de keten bepaald wordt door de zwakste schakel. Voorbeelden hiervan zijn de belemmering van de volumetoename van de ventrikel bij pericarditis constrictiva, de vermindering van het functionnerend diffusieoppervlak van

de longen bij emphyseem of het verminderde vermogen tot zuurstofbinding door een tekort aan haemoglobine bij anaemieën. Deze voorbeelden hebben gemeen, dat zij ergens ingrijpen in het complexe proces van het transport van zuurstof uit de lucht naar de spieren.

De criteria voor het lichamelijk prestatievermogen zullen dus gevonden moeten worden in

1) ventilatie
2) diffusie
3) zuurstofbindend vermogen van het bloed
4) circulatie.

Bij lichamelijke inspanning komt de zuurstofopname eerst na enige minuten op een niveau, dat door de inspanning bepaald wordt. Deze initiële zuurstofschuld wordt pas na afloop van de inspanning ingelost door bovengenoemde grootheden. Het criterium van de zuurstofschuld zal dan ook in de volgende hoofdstukken ter sprake komen. Deze zuurstofschuld, die het verschil vormt tussen de voor de arbeid benodigde en de tijdens de arbeid opgenomen hoeveelheid zuurstof, wordt in de eerste minuten van de herstelphase ingelost. Indien een afwijking van het circulatieapparaat beperkingen oplegt aan zuurstofopneming of het transport naar de weefsels, zal de zuurstofschuld tijdens arbeid abnormaal groot worden. Door vergelijking van de werkelijk gevonden zuurstofschuld met de op grond van de geleverde inspanning te verwachten zuurstofschuld kan men een inzicht krijgen in de mate van beperking van zuurstofopneming of -transport en aldus in het lichamelijk prestatievermogen.

Hoofdstuk II

BESPREKING DER IN DE LITERATUUR BESCHREVEN METHODEN

Robinson publiceerde in 1938 een onderzoek naar het lichamelijk prestatievermogen op verschillende leeftijden. Hij bepaalde daartoe de *maximale zuurstofopname* tijdens arbeid op de tredmolen bij groepen proefpersonen van 25-, 52- en 63-jarige leeftijd en vond daarbij waarden van respectievelijk 3,52, 2,63 en 2,35 liter per minuut.

Bij gezonde proefpersonen, speciaal bij sportlieden, kan men het lichamelijk prestatievermogen meten aan de maximale zuurstofopname.

Zo heeft Åstrand in 1952 het lichamelijk prestatievermogen van leerlingen van het Instituut voor Lichamelijke Opvoeding te Stockholm, dat onder leiding staat van Prof. E. H. Christensen, gemeten door hen op een tredmolen of een fietsergometer een maximale prestatie te doen leveren. De benodigde zuurstofopname is door Åstrand als criterium gebruikt om het lichamelijk prestatievermogen vast te stellen. Hij heeft bij 112 vrouwen en 115 mannen tussen 4 en 33 jaar de maximale zuurstofopname bepaald; bij de volwassen man was het gemiddelde 4,1 1/min., bij de vrouw 2,9 1/min. Het lichamelijk prestatievermogen van de vrouw berekend uit de maximale zuurstofopname is $\frac{2{,}9}{4{,}1} = 70\%$ van dat van de man.

Door Åstrand werd in navolging van Sjöstrand het verband nagegaan tussen de *totale hoeveelheid haemoglobine* en de door hem als criterium voor het lichamelijk prestatievermogen gekozen maximale zuurstofopname; de correlatie-coëfficiënt was 0,97. De totale hoeveelheid haemoglobine bedroeg bij mannen ongeveer 700 g en bij vrouwen ongeveer 500 g. Aanvaardt men de totale hoeveelheid haemoglobine als een criterium voor het lichamelijk prestatievermogen, dan volgt uit de verhouding tussen het totale haemoglobinegehalte van man en vrouw, dat het lichamelijk prestatievermogen van de vrouw $\frac{500}{700} = 71\%$ van dat van de man bedraagt.

Åstrand en Ryhming (1954) toonden bij een andere groep proefpersonen aan, dat de polsfrequentie bij een bepaalde arbeidsbelasting op de fietsergometer correleerde met de maximale zuurstofopname. Zij construeerden een nomogram, waaruit de maximale zuurstofopname valt af te leiden uit de arbeidsbelasting (of zuurstofopname) en de polsfrequentie

bepaald tijdens een submaximale belasting op een fietsergometer. Later werd door middel van een steptest (ÅSTRAND (1958)) een proef verkregen, waaruit zonder maximale belasting toch de maximale zuurstofopname voorspeld kan worden.

Door SJÖSTRAND (1947) werd als criterium voor het lichamelijk prestatievermogen de belasting genomen, waarbij de proefpersoon een *polsfrequentie van 170 slagen per minuut* heeft. Hij vond bij een onderzoek van 136 proefpersonen een correlatiecoëfficiënt van 0,90 ± 0,01 tussen de totale hoeveelheid haemoglobine en de belasting bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut.

Door WAHLUND (1948) werden patiënten met hart- en longaandoeningen op dezelfde wijze onderzocht op de fietsergometer van KROGH (1913). Daar het bij patiënten ongeoorloofd is de belasting tot het maximum op te voeren begon hij met een belasting van 300 kgm/min. (ongeveer 50 watt) en om de ongeveer 6½ minuut werd deze met 300 kgm/min. verhoogd. Polsfrequentie, zuurstofopname, ademminutenvolume en respiratiefrequentie werden gemeten. Naast het criterium van de arbeidsbelasting, waarbij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut wordt bereikt, gebruikt hij de respiratiefrequentie van 30 maal per minuut als een teken, dat de maximale arbeidsbelasting voldoende dicht benaderd was. Op deze wijze ontstond een indruk van het lichamelijk prestatievermogen naar gelang de proefpersonen 300, 600, 900 enz. kgm/min. konden verrichten. Daar gezonde ongetrainde proefpersonen gemiddeld 1200 kgm/min. kunnen verrichten, verschaft dit dus een klasseverdeling overeenkomend met 25% verschil in lichamelijk prestatievermogen. WAHLUND vond tussen groepen gezonde proefpersonen en groepen hart- en longpatiënten geen verschil in zuurstofopname bij een zelfde arbeidsbelasting en dus geen verschil in de mechanische efficiëntie. De respiratiefrequentie bij een bepaalde belasting vond hij significant hoger bij een groep van patiënten met rheumatische klepafwijkingen en een groep met longziekten dan bij gezonde proefpersonen. Door WAHLUND werd tijdens inspanning het *ademminutenvolume* bij patiënten nagegaan. De ventilatie nodig voor opname van 1 liter zuurstof was hoger bij sommige patiënten met hartziekten en emphyseem.

MÜLLER (1950) beschreef de ook door ons gebruikte prestatie-polsindex als maat voor het lichamelijk prestatievermogen. Hij gebruikte daartoe een in 1952 beschreven fietsergometer, die automatisch een continu toenemende belasting oplegde aan de proefpersoon. Hiermee werd tegemoet gekomen aan het bezwaar van de trapsgewijze toename van de belasting. De proefpersoon verrichtte arbeid van 0 tot 25 kgm/sec., waarbij de belasting per minuut met 0,5, 1 of 1,5 kgm/sec. toenam. Het gemiddelde van de polsfrequentie van de tweede helft van iedere minuut van de proef werd bepaald en de prestatie-pols-index uit de regressielijn berekend. De index wordt weergegeven als de toename van de polsfrequentie

bij een stijging van de belasting met 1 kgm/sec. (overeenkomend met ongeveer 10 watt) per minuut.

Müller vond in de meeste gevallen een correlatie tussen de polsfrequentie en de belasting van meer dan 0,94. Voor de correlatie tussen belasting en zuurstofverbruik vond hij 0,99. Hij vond geen verschil in prestatie-pols-index bij een toename van de belasting met 0,5, 1 of 1,5 kgm/sec. per minuut. De waarde voor de index wordt het laagst tussen 45 en 60 pedaalomwentelingen per minuut; dit komt overeen met de laagste zuurstofopname en de hoogste efficiëntie. De index neemt sterk af onder invloed van training. Bij eiwitondervoeding stijgt de index overeenkomstig aan de daling van het lichaamsgewicht. De prestatie-pols-index bedraagt voor industriearbeiders, die zwaar lichamelijk werk verrichten, 2 tot 3; voor kantoorbedienden ongeveer 4 en voor huisvrouwen 5 tot 6.

Door andere onderzoekers werd de *zuurstofschuld* bepaald ten einde een indruk te krijgen van het lichamelijk prestatievermogen. De zuurstofschuld is de hoeveelheid voor de arbeid benodigde zuurstof, die niet tijdens de arbeid, maar eerst daarna wordt opgenomen. De grootte van de zuurstofschuld wordt derhalve beïnvloed door de mate van inspanning en, in bepaalde pathologische gevallen, door een min of meer tekortschieten van het zuurstoftransport.

Nylin (1952) meet de zuurstofopname met behulp van de Krogh spirometer gedurende de tweede, derde en vierde minuut na trappenlopen. De arbeid wordt verricht op twee rondleidende trappen van zes treden op en zes treden af, waarvan de hoogste trede een meter boven de vloer ligt. Door middel van aanflitsende lichtjes in de treden kan de juiste snelheid van het rondlopen aan de patiënt worden opgelegd. De netto zuurstofopname in de tweede, derde en vierde minuut na het lopen bedraagt bij gezonde proefpersonen na vijf ronden met 88 treden per minuut minder dan 40% van de ruststofwisseling; na vijf ronden met 160 treden per minuut minder dan 70% en na tien ronden met 208 treden per minuut minder dan 100% van de ruststofwisseling. De proef heeft behalve bij hartpatiënten ook bij longpatiënten zin en heeft als voordeel, dat een physiologische arbeid wordt verricht, die door de meeste patiënten nog dagelijks wordt uitgevoerd en waarvoor geen uitzonderlijke training nodig is.

In 1949 beschreven Jongbloed, Van Nieuwenhuizen en Van Goor een hartfunctieproef, die berustte op de doorlopende registratie van het zuurstofverbruik tijdens rust en lichte arbeid. Zij noemden dit het functiocardiogram. Zij bestudeerden het verloop van de lijn bij de overgang van rust naar arbeid en konden hieruit een inzicht krijgen in de functionele toestand van het hart.

Bink en Bonjer beschreven in 1955 een proef, waarbij niet alleen de zuurstofschuld doch ook het ademminutenvolume en de polsfrequentie worden gemeten voor de bepaling van het lichamelijk prestatievermogen.

In 1957 beschreven JONGBLOED, VAN NIEUWENHUIZEN en VAN GOOR een verdere ontwikkeling van hun proeven berustend op het functiocardiogram na onderzoek van een groot aantal proefpersonen en hartpatiënten. Naast de bestudering van de vorm van de curve voerden zij een quantitatieve methode in tot het meten van de zuurstofschuld. Deze werd uitgedrukt in een percentage van de zuurstofopname, die nodig was voor de gehele arbeid. Op grond van kennis van de normale waarde (15%) werd vastgesteld in hoeverre de hartfunctie tekortschoot bij patiënten. Ten einde vast te stellen of een steady state werd bereikt, vergeleken zij de zogenaamde initiële zuurstofschuld met de zuurstofschuld in de herstelphase en gingen zij na of het respiratorisch quotiënt tijdens arbeid boven 1,0 steeg. Als standaardarbeidsbelasting bij hun proeven kozen zij 60 watt op een fietsergometer.

BURGER beschreef in 1957 een ergometertest ten behoeve van de bedrijfskeuring, vooral van oudere mensen. Hij neemt hiervoor als criterium de hartarbeid, welke bij benadering wordt berekend uit polsfrequentie en bloeddruk. Hij berekent zijn „Heart Work Index" (H.W.I.) met de formule:

$$\text{H.W.I.} = \frac{F\ (S - D + 100)\ (S + D)}{2 \times 10^6}$$

waarin F de polsfrequentie
S de systolische en
D de diastolische bloeddruk voorstellen.

Ten einde normen te verkrijgen bepaalt hij de waarde van de H.W.I. bij een belasting van 10, 70 en 110 watt op de fietsergometer van LANOOY en na 2, 4 en 6 minuten na het staken van de arbeid. Hij vond als normale waarden voor de index in rust 1,3, bij een arbeidsbelasting van 10 watt 1,6, bij 70 watt 2,25 en bij 110 watt 3,25.

Hoofdstuk III

BESCHRIJVING VAN DE FUNCTIEPROEF EN VAN DE GEBRUIKTE APPARATUUR

A. *Keuze van de arbeidsbelasting*

Zoals in hoofdstuk I is uiteengezet, kan het lichamelijk prestatievermogen bepaald worden door het meten van de maximale arbeid per tijdseenheid, of door het meten van die physiologische reacties die betrekking hebben op het „zuurstoftransportsysteem".

Het is niet verantwoord bij patiënten de arbeidsbelasting op te voeren tot het maximum. Het is daarom noodzakelijk het lichamelijk prestatievermogen van hartpatiënten te bepalen bij submaximale belastingen. Derhalve is men aangewezen op de bepaling van de physiologische reacties op lichamelijke inspanning. Het is echter voor de nauwkeurigheid van de meting van belang om een zo groot mogelijke reactie van het organisme op de arbeidsbelasting op te wekken zonder dat hierdoor de patiënt in gevaar wordt gebracht. Een practische moeilijkheid is dat men van tevoren alleen maar kan schatten bij welke arbeidsbelasting dit is. Wahlund laat, zoals in hoofdstuk II werd beschreven, de patiënt een inspanningsproef met steeds hogere belasting uitvoeren. Wij gaven echter de voorkeur aan de methode van Müller, die gebruik maakt van een fietsergometer met continu toenemende belasting. De voordelen van de continu oplopende belasting zijn:

1. iedere patiënt, die in staat is zich te voet naar de onderzoekkamer te begeven, is ook in staat in de eerste minuten van de proef de fietsergometer aan de gang te houden, daar de belasting dan van nul af (behoudens de nullast) doorlopend met een gering bedrag toeneemt;
2. de proef kan zo lang worden voortgezet totdat de physiologische reacties voldoende groot zijn geworden;
3. indien nodig kan de proef onmiddellijk gestaakt worden zonder daardoor van onwaarde te worden;
4. de arbeidsbelasting, waarbij bepaalde symptomen aan de dag treden, is nauwkeuriger af te lezen dan bij het trapsgewijze opvoeren van de arbeidsbelasting.

Indien tot een bepaalde belasting wordt opgeklommen op de fietsergometer met continu toenemende belasting en daarna de belasting op hetzelfde niveau gehouden wordt, blijkt de proefpersoon dezelfde zuurstof-

opname te handhaven. Ook de polsfrequentie, het ademminutenvolume en de bloeddruk blijven constant. De proefpersoon doorloopt tijdens de continu toenemende belasting als het ware een reeks van zogenaamde steady states. De toename van de belasting mag naar onze ervaring niet zo groot zijn, dat de zuurstofopname per minuut met meer dan 150 ml toeneemt. Dit betekent dat bij de fietsergometer de toename per minuut niet meer dan 10 watt mag bedragen.

Het is natuurlijk mogelijk met een ander type ergometer dan de fietsergometer een inspanningsproef in te richten. Het is evenwel van belang dat een groot aantal spieren arbeid verricht, daar er alleen dan een grote zuurstofbehoefte ontstaat. De spieren zelf behoren niet de beperkende factor te worden. Dit is wel het geval, indien een betrekkelijk kleine spiergroep belast wordt. Dan worden aan ventilatie, diffusie en circulatie slechts geringe eisen gesteld.

Naast de ergometers, die ontwikkeld zijn om één spier of spiergroep te bestuderen, zijn zwaardere ergometers ontworpen, zoals de fietsergometer, zwengelergometer en de tredmolen.

Het voordeel van de fietsergometer boven de tredmolen is dat de uitwendige arbeid direct gemeten kan worden en dat het lichaamsgewicht van de onderzochte een geringe rol speelt.

Continu oplopende belasting is op de tredmolen in principe wel mogelijk door toenemende snelheid of toenemende hellingshoek van de band, maar is in de practijk moeilijk uitvoerbaar.

De zwengelergometer heeft als bezwaar, dat kleinere spiergroepen worden gebruikt dan bij het fietsen of lopen, terwijl het lichaam door andere spieren in de juiste houding moet worden gefixeerd.

B. *Het meten der physiologische reacties*

Wanneer men het lichamelijk prestatievermogen wil bepalen uit inspanningsproeven met submaximale belastingen, is het van belang de physiologische reacties, die betrekking hebben op het transport van zuurstof vanuit de lucht naar de spier op de voet te volgen. Daarom is er bij onze functieproef naar gestreefd zoveel mogelijk doorlopend te registreren.

De opstelling van de apparatuur, waarmee de verschillende functies van de patiënt worden gemeten, is schematisch afgebeeld in figuur 1.

De patiënt ademt door een mondstuk, dat verbonden is met een ademventiel. De inhoud van dit systeem bedraagt ongeveer 28 ml, doch de effectieve dode ruimte is tot enkele ml teruggebracht met behulp van een tussenschot tussen inspiratie- en exspiratiezijde van het ventiel. Daartegenover staat, dat bij het gebruik van het monstersysteem, beschreven onder meer door RAHN en OTIS (1949), de dode ruimte weer wordt vergroot met de pendellucht van dit systeem; deze bedraagt ongeveer 10 tot 20 ml. De zuurstoffractie van de end tidal air wordt door een zuurstofanalysator volgens PAULING (1945) geregistreerd.

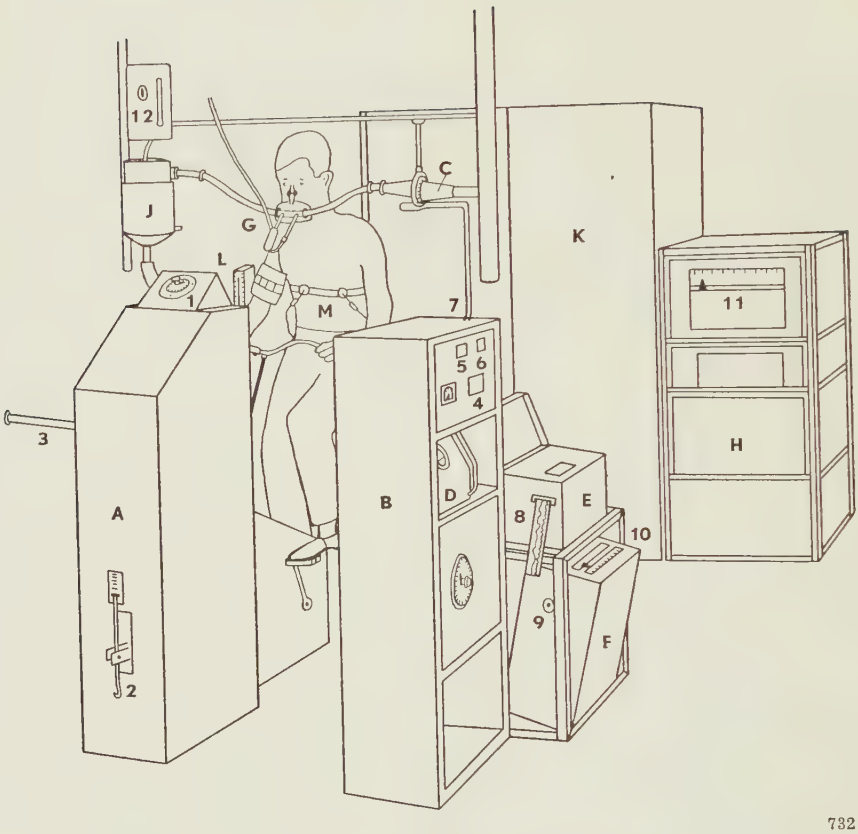


Fig. 1 Tekening van de opstelling der apparatuur in gebruik bij de beschreven belastingsproef.

Beschrijving van figuur 1

A. Fietsergometer

1. Instelknop voor de trapfrequentie (aan de achterzijde de toerenaanwijzer)
2. IJkmechanisme
3. Zwengel

B. Flowmeterintegrator

4. Telwerk voor waarneming ademminutenvolume
5. Telwerk voor respiratiefrequentie
6. Telwerk voor polsfrequentie
7. Ingang manometer

C. LILLY flowmeter aan de toevoerbuis van de buitenlucht met verbindingsbuizen naar de manometer in de flowmeterintegrator

D. Cardiotachometer met wijzerinstrument

E. Electrocardiograaf

8. Electrocardiogram en inspiratiecurve

F. Regelapparatuur voor de continu toenemende belasting

9. Instelknop voor 5 of 10 watt toename per minuut
10. Schaal der belasting in watts

G. Mondstuk met kleppensysteem, monstersysteem voor eind-exspiratielucht en afvoerbuis naar de PAULING zuurstofmeter

H. PAULING zuurstof-spanningsmeter

11. Curve van de zuurstoffractie in eind-exspiratielucht

J. Mengtrommel voor gemengde exspiratielucht

12. Kraan ter aanbieding van buitenlucht of gemengde exspiratielucht aan de diaferometer

K. Klimaatkast, waarin de diaferometer is opgesteld

L. Bloeddrukmeter met manchet

M. Band met de electroden voor de electrocardiograaf en de cardiotachometer

De lucht komt door een buizensysteem van buiten en passeert een flowmeter volgens LILLY (1950). Aan de LILLY flowmeter is een integrator verbonden, die de aflezing van de inspiratie in liters per minuut mogelijk maakt.

Het zuurstof- en koolzuurpercentage verschil tussen in- en exspiratielucht wordt met behulp van de diaferometer volgens NOYONS gemeten.

Verder zijn weergegeven de cardiotachometer ter bepaling van de polsfrequentie, de electrocardiograaf en de bloeddrukmeter.

Gedurende de gehele proef worden opgenomen:

1. het ademminutenvolume;
2. het zuurstof- en koolzuurpercentageverschil tussen inspiratie- en exspiratielucht;
3. de zuurstoffractie van de eind-exspiratielucht;
4. de polsfrequentie;
5. het electrocardiogram gedurende ongeveer 15 seconden aan het begin van iedere minuut; (tijdens de eerste minuut van de recovery en wanneer afwijkingen optreden voortdurend)
6. de bloeddruk om de twee minuten en gedurende het begin van de recovery iedere minuut.

Door vermenigvuldiging van het ademminutenvolume (1) en het zuurstof-, respectievelijk koolzuurpercentageverschil (2) kan men de zuurstofopname en de koolzuuruitscheiding in iedere phase van de proef berekenen.

Voordat de proef begint zit de patiënt enkele minuten op een stoel. Nadat de rubberband met de electroden, die nodig zijn voor het maken van het electrocardiogram en het tellen van de polsfrequentie is aangebracht, neemt de patiënt plaats op de fietsergometer. Voor het schrijven van de nullijnen op de fotografische film (zie figuur 4), die het zuurstof- en koolzuurfractieverschil gemeten met de diaferometer weergeeft, is het nodig dat gedurende drie minuten door alle kanalen van de diaferometer buitenlucht wordt doorgeleid. In deze drie minuten zit de patiënt reeds op de fietsergometer en ademt hij door het mondstuk uit in de mengtrommel, die dus bij het begin van de eigenlijke meting reeds gevuld is met gemengde exspiratielucht. Gedurende vijf minuten worden waarnemingen gedaan aan de op de fiets stil zittende patiënt. Vlak voordat de patiënt begint te fietsen wordt de ergometer met een zwengel in gang gebracht op de vereiste trapfrequentie. Meestal is dit 60 omwentelingen per minuut. De toerenaanwijzer [1]) wordt daardoor op een rode streep gebracht. Aan de patiënt wordt gevraagd deze wijzer zo goed mogelijk op de rode streep te houden gedurende het fietsen. Op deze wijze wordt de trapfrequentie constant gehouden.

[1]) Niet zichtbaar in figuur 1.

De belasting van de ergometer neemt met 5 of 10 watt per minuut toe. Bij patiënten, die in het dagelijks leven niet in staat zijn te fietsen en van wie dus verwacht kan worden, dat zij minder dan 60 watt zullen kunnen verrichten, wordt de toename van de belasting ingesteld op 5 watt per minuut.

De proef wordt beëindigd, indien de polsfrequentie tot 170 slagen per minuut is gestegen of indien er belangrijke electrocardiografische veranderingen verschijnen of duidelijke dyspnoe of cyanose of subjectieve klachten optreden. Geëindigd wordt bij voorkeur op een volle minuut na het begin van de proef. De herstelphase wordt gedurende precies 10 minuten gevolgd. Daarna dienen nog weer gedurende drie minuten de nullijnen van de diaferometercurve te worden getrokken door buitenlucht door te leiden.

C. *Gebruikte apparatuur*

1. *Ergometer*

Voor de beschreven functieproef wordt gebruik gemaakt van een gemodificeerde fietsergometer volgens Lanooy. Evenals bij de ergometer van Krogh wordt in een koperen schijf, die tussen de polen van een electromagneet draait, een zwerfstroom opgewekt. Lanooy construeerde zijn ergometer zodanig, dat de draaisnelheid van deze schijf bij een normaal traptempo zeer hoog ligt. Hierdoor bereikte hij, dat de belasting physisch gesproken onafhankelijk wordt van de trapfrequentie en slechts bepaald wordt door de mate van bekrachtiging van de electromagneet. Het op toeren brengen van deze schijf kost echter vrij veel inspanning. Daarom brengen wij deze met een zwengel op gang voordat de patiënt gaat trappen.

Aan de beschrijving van Lanooy en Bonjer (1956) wordt het volgende ontleend:

Bij de ontwikkeling van de Lanooy wervelstroomergometer werd gezocht naar een mechanisme, dat bij variërend toerental de in warmte omgezette energie, dus het product van de per tijdseenheid afgelegde weg en de remkracht, gelijk zou houden. Het met dit product aangegeven arbeidsvermogen A kan worden berekend in kgm/sec. volgens de formule:

$$A = P.2\,\pi\,r.\frac{n}{60}, \text{ waarin}$$

P = kracht, welke op de remmagneet werkt in kg

r = afstand van as tot aangrijpingspunt van de remkracht in m

n = aantal omwentelingen van de schijf per minuut

Wanneer A gelijk moet blijven bij wisselingen in n, dan zal P of r of P × r omgekeerd evenredig moeten veranderen.

Lanooy heeft nagegaan welke betrekking er bestaat tussen de remkracht P en het toerental n, wanneer het toerental steeds verder wordt opgevoerd. Bij deze proeven bleek P een maximum te hebben, om weer af te nemen bij nog hogere toerentallen. Wanneer het maximum voldoende ver gepasseerd is, neemt

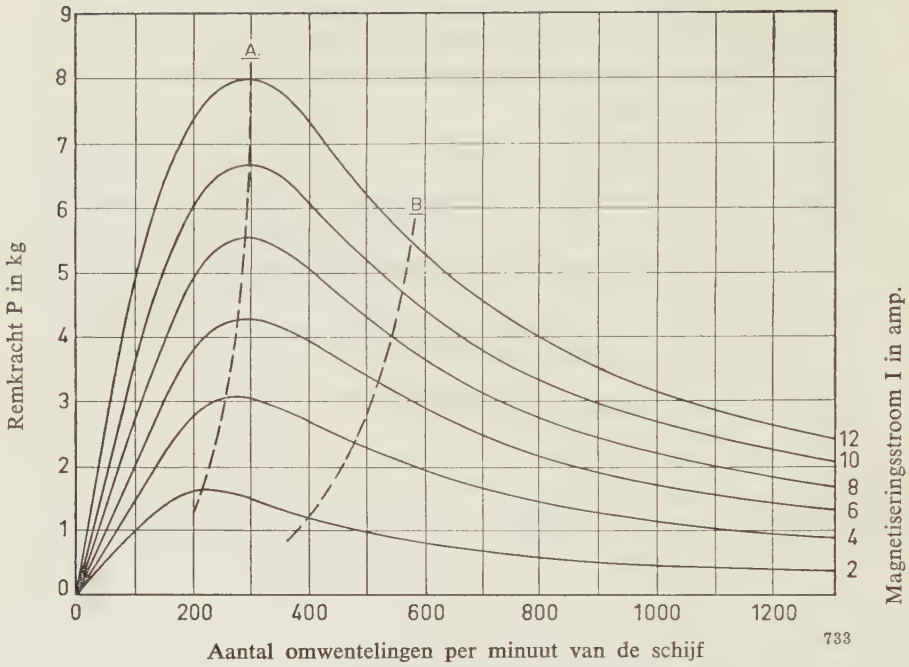


Fig. 2 Diagram van de relatie tussen remkracht P, aantal omwentelingen per minuut van de schijf- en de magnetiseringsstroom I.

A = meetkundige plaats van de maximale remkracht
B = meetkundige plaats van het begin van het hyperbolische verloop en van de kritische snelheid

de remkracht af bij toenemend toerental volgens een hyperbolische curve. Het benutten van dit gebied (dus in figuur 2 rechts van de lijn B), waarbij $P \times n$ constant is, heeft geleid tot de constructie van de hier beschreven ergometer. Door de keuze van de overbrengingsverhouding der kettingwielen kan bereikt worden, dat de kritische draaisnelheid van de remschijf reeds overschreden is bij zeer lage trapfrequenties.

De ijking van deze ergometer is mogelijk gemaakt door de electromagneet aan een juk op te hangen, dat om dezelfde as draaibaar is als de remschijf. Tijdens de eigenlijke proef kan het koppel worden gecontroleerd door aflezing op een daartoe bestemde schaal.

Hoewel physisch gesproken volledig aan de eis voldaan is, dat het toerental het remmend vermogen niet beïnvloedt, is het physiologisch niet onverschillig met welk tempo een bepaalde arbeidsprestatie geleverd wordt. Daarom is een toerenaanwijzer aangebracht, door middel waarvan een bepaald toerental aan de patiënt wordt opgelegd. In de practijk betekent dit, dat de trapfrequentie op 60 per minuut wordt gehouden.

Bij proeven met opklimmende belasting wordt de magnetiseringsstroom geleidelijk opgevoerd door met behulp van een synchroonmotor een weerstand te doen afnemen.

2. *Flowmeter*

Voor de meting van de ventilatie, tijdens de functieproef, maken wij bij voorkeur gebruik van een mondstuk. Een masker heeft het nadeel, dat het de dode ruimte vergroot, wat het ademminutenvolume doet toenemen met ongeveer het aantal respiraties maal deze dode ruimte. Door te laten ademen via een mondstuk met tussenschot kan men deze dode ruimte zo klein mogelijk maken. Het is voor een goede end tidal air sampling nodig, dat er een zeker drukverschil over het apparaat bestaat ten einde het condoom te bewegen, zodat de kleppen een zeker minimum aan weerstand moeten hebben. In onze opstelling in zijn geheel is de drukschommeling bij een ademminutenvolume van 10 liter ongeveer 2 cm waterdruk en bij een ademminutenvolume van 100 liter ongeveer 10 cm waterdruk.

Voor het meten van de ventilatie in liters per minuut wordt de LILLY flowmeter (1950) gebruikt tezamen met een integrator.

De LILLY flowmeter bestaat uit twee tegenover elkaar geplaatste trechters. Hiertussen is een gaas met 400 mazen per strekkende inch uitgespannen. Indien een luchtstroom het gaas passeert treedt er een drukverschil aan beide kanten van het gaas op, dat naar een condensatormanometer wordt overgebracht. Het drukverschil bedraagt 10 mm waterdruk bij een constante luchtstroom van ongeveer 200 l/min. Om veranderingen van het gaas door het vocht in de uitademingslucht te voorkomen wordt de inspiratielucht door de flowmeter geleid.

De condensatormanometer is opgenomen in een electronische generatorschakeling. Het bespreken van de wijze, waarop genoemde frequentieveranderingen worden omgezet in electrische spanningsveranderingen en op welke wijze deze een mechanische integrator aandrijven, valt buiten het bestek van deze verhandeling.

De ijkcurve bleek bij ijking met een constante luchtstroom vrijwel recht in het gebied van 0 tot 200 l/min. Het werd echter niet alleen van belang geacht de karakteristiek bij constante luchtstroom te leren kennen, doch ook de flowmeter plus integrator te ijken met behulp van een intermitterende luchtstroom, zoals die zich voordoet bij de ademhaling. Hiertoe verrichtten verschillende proefpersonen arbeid op een fietsergometer met een constante belasting tussen 0 en 200 watt. Hierbij werd de hoeveelheid ingeademde lucht met de LILLY flowmeter gemeten en de uitgeademde hoeveelheid lucht opgevangen in Douglasbags. Na correctie van het volume van de exspiratielucht op inspiratielucht met behulp van de resultaten van de gasanalyse bleek de coëfficiënt van variatie 1,1% ten opzichte van de met continue flow bepaalde rechte te zijn.

3. *Diaferometer*

De diaferometer is een gasanalyse-apparaat, dat gebruik maakt van de verschillen in het warmtegeleidingsvermogen van de verschillende gassen, zoals oorspronkelijk beschreven door NOYONS (1937) en later door VISSER (1957).

De te analyseren lucht wordt door een viertal kanalen geleid, die zijn geboord in een koperen blok. In deze kanalen zijn dunne platinadraden uitgespannen. Twee kanalen dienen voor de meting van het fractieverschil van de zuurstof der in- en uitademingslucht en twee kanalen zijn voor de koolzuurmeting bestemd (zie figuur 3).

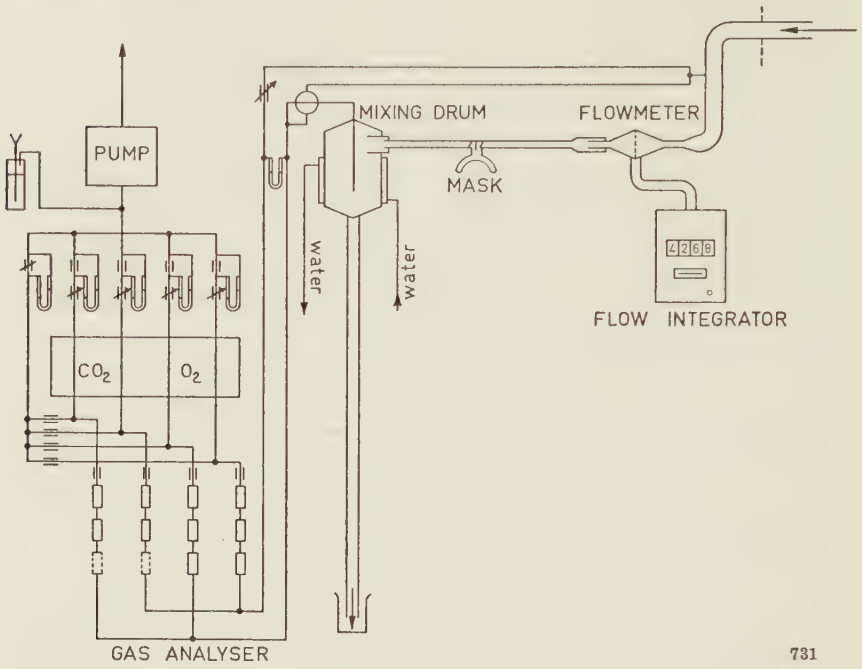


Fig. 3 Schema van de opstelling voor het meten van de stofwisseling.

De platina draden worden verwarmd met een constante stroom van 100 mA uit een stroomstabilisator, die door het net wordt gevoed en dag en nacht aanstaat. De draden zijn opgenomen in een brug van WHEATSTONE, die afhankelijk van de samenstelling van het gasmengsel meer of minder uit balans wordt gebracht. De verschillen in warmtegeleiding van de verschillende gassen veroorzaken een verandering in de temperatuur en daarmee in de electrische weerstand van de draden en daardoor vertoont de galvanometer een uitslag proportioneel met de mate, waarin het electrische evenwicht in de brug wordt verstoord. De galvanometers zijn spiegelgalvanometers en de weerkaatste lichtbundels worden op een fotografische film geregistreerd. Daar de wartegeleiding van koolzuur vergeleken met stikstof 0.7 en die van zuurstof 1.03 is en het verschil in geleidingsvermogen dus in het ene geval 0.3 en in het andere 0.03 bedraagt, moet de gevoeligheid van het zuurstofsysteem 10 maal groter zijn dan voor het koolzuurmeetsysteem.

Ten einde een doorlopende registratie van de beide percentageverschillen tussen in- en exspiratielucht mogelijk te maken, is de diaferometer in een kast geplaatst met een constante temperatuur (BONJER (1955)).

Voor het meten van de zuurstoffractie gaat de aangeboden lucht eerst door natronkalk voor de absorptie van CO_2.

In de vier kanalen van het meetblok wordt een stroming van 60 ml/min. onderhouden. Dit wordt gecontroleerd aan stromingsmeters, die zijn gecombineerd met instelbare ventielen. De tijd, die de luchtstroom nodig heeft om vanaf de mengtrommel met exspiratielucht de kanalen te bereiken, bedraagt voor 90% uitslag 35 seconden. Om het interpreteren der curve te vergemakkelijken worden de tijdlijnen op de film geprojecteerd, dat het tijdsverschil schijnbaar gecompenseerd wordt (zie figuur 4).

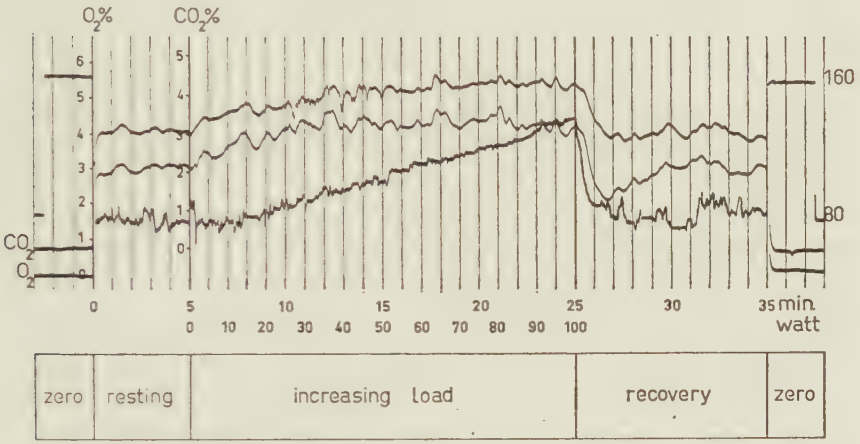


Fig. 4 Fotografische registratie der percentageverschillen van zuurstof en koolzuur in in- en exspiratielucht en van de polsfrequentie tijdens een inspanningsproef met oplopende belasting van 0 tot 100 watt.
Op de abscis zijn weergegeven de tijd in minuten en de belasting in watts. Op de ordinaat zijn weergegeven de percentageverschillen voor de zuurstof en de koolzuur zoals die door ijking gevonden werden. Tevens staan de ijkfrequenties van de cardiotachometer aangegeven. Vóór en ná de eigenlijke meting worden de nullijnen van de diaferometer en de ijkfrequenties van de cardiotachometer geregistreerd (zero). Van 0 tot 5 minuten worden de waarden in rust geregistreerd.
Bij de inspanning neemt de polsfrequentie lineair toe met de belasting. De percentageverschillen stijgen in de eerste 3 à 4 minuten vrij sterk. De $\triangle O_2$ blijft vrijwel constant op dit niveau, de $\triangle CO_2$ stijgt geleidelijk verder. Na afloop van de inspanning daalt de polsfrequentie tot de rustwaarde. De $\triangle O_2$ vertoont een dal, alvorens tot de oorspronkelijke waarde terug te keren. De $\triangle CO_2$ doet dit niet.

Een voorwaarde bij het gebruik van de diaferometer is het constant houden van het watergehalte van het te onderzoeken gasmengsel. Geheel drogen of geheel verzadigen stuit op technische moeilijkheden indien men snelle uitslag nastreeft. Om deze reden voerden wij een methode in, waarbij steeds een zelfde, zij het niet volledige, verzadiging wordt gewaarborgd.

Deze berust op het principe, dat een constante luchtstroom bij gelijkblijvende temperatuur over een uitgespannen gaasje strijkt, dat steeds in dezelfde mate wordt bevochtigd, doordat het aan de onderzijde is gedrenkt in een waterreservoir met constant niveau.

De ijking geschiedt door exspiratielucht, waarvan de samenstelling met behulp van gasanalyse is vastgelegd, uit een spirometer door de diaferometer te leiden. Voor deze ijking werd gebruik gemaakt van de HALDANE gasanalyse. Daar deze op zichzelf een zekere spreiding vertoont werd steeds van hetzelfde ijkmengsel een tweetal analyses verricht. Wanneer men met een aldus geanalyseerd gasmengsel de diaferometer ijkt vindt men ijkconstanten met een coëfficiënt van variatie van 1.95% voor zuurstof en 4.14% voor koolzuur.

4. *Het monsteren van eind-exspiratielucht*

Voor het bepalen van de zuurstoffractie in de „end tidal air" wordt het monstersysteem volgens RAHN en OTIS (1949) en de PAULING zuurstofspanningsmeter (1945) gebruikt.

Het verschil van ons systeem met de door RAHN en OTIS beschreven methode is er in gelegen, dat wij niet uit de verbindingsbuis met de eindexspiratiezijde de lucht wegzuigen, maar uit het condoom. Hieruit wordt met een membraanpompje 120 ml/min. naar de zuurstofspanningsmeter gezogen.

De PAULING zuurstofmeter maakt gebruik van de paramagnetische eigenschappen van het zuurstofmolecuul en geeft de partiële zuurstofspanning in het gasmengsel aan.

Ten behoeve van de ijking van de PAULING zuurstofspanningsmeter worden stikstof en buitenlucht doorgeleid.

5. *Cardiotachometer*

Voor het tellen van de polsfrequentie heeft men de keuze tussen verschillende methoden. Men kan de arteria radialis of de arteria carotis palperen en na verkregen vaardigheid de polsfrequentie tijdens de inspanningsproef vaststellen (ÅSTRAND (1958)). Andere onderzoekers (MÜLLER (1950)) tellen de polsfrequentie door middel van een plethysmografische methode, waarbij een fotocel aan de ene kant en een lampje aan de andere kant van het oor wordt geplaatst. Deze methode geeft volgens onze ervaring moeilijkheden onder meer omdat soms een dubbel signaal wordt verkregen uit een dicrote polsgolf (REDFEARN (1954)). Wij gaven de voorkeur aan het tellen van de hartfrequentie met behulp van een cardiotachometer, die berust op gebruik van het electrocardiogram en die werd ontwikkeld door BEKKERING (1956). Opgemerkt zij dat bij deze methode de niet effectieve slagen van de ventrikel bij extrasystolen en bij atriumfibrillatie worden waargenomen, hetgeen bij de palpatie en de plethysmografische methode meestal niet het geval is.

De cardiotachometer grijpt aan op de R- of de S-top van het electrocardiogram. De electroden worden op de thorax aangebracht zoals beschreven in het

deel van dit hoofdstuk betreffende de electrocardiografie. De cardiotachometer wordt met een kabel verbonden aan de electrocardiograaf. In principe wordt gebruik gemaakt van de snelle potentiaalwisseling van de actiestromen van het hart. Wanneer de S-top door zijn grootte de voorkeur verdient boven de R-top, is het apparaat met behulp van een schakelaar om te polen. Voorwaarde is, dat de potentiaal van de top meer dan 1 mV bedraagt en dat het QRS-complex niet al te breed is (bundeltakblock).

Behalve een teller is ook een wijzerinstrument aangebracht, dat een directe aflezing van de polsfrequentie in slagen per minuut mogelijk maakt.

Het telwerk kan voortdurend gecontroleerd worden aan de bewegingen van de naald in de electrocardiograaf.

6. *Electrocardiografie*

Bij elke functieproef wordt het electrocardiogram tijdens rust en tijdens arbeid opgenomen. Dit geschiedt volgens de aanwijzingen van Vonk (1953). Er wordt een rubberband om de thorax bevestigd met electroden op:

1. plaats van de ictus cordis
2. rechts in de medioclaviculairlijn
3. rechts in de scapulairlijn.

De afleiding van links-voor naar rechts-achter geeft bij een ijkuitslag van 5 mm voor 1 mV een goed electrocardiogram, ook tijdens hoge belasting.

Aan het begin van iedere minuut van de proef wordt een twintigtal slagen van het electrocardiogram opgenomen met een direct schrijvende electrocardiograaf. De eerste minuut van de herstelperiode wordt in zijn geheel geregistreerd.

7. *Bloeddrukmeting*

De bloeddruk wordt auscultatoir gemeten en wel tijdens inspanning om de twee minuten en tijdens het begin van de recovery om de minuut. Meestal ligt de manchet om de linker bovenarm. Een enkele maal werd aan beide armen alternerend om de minuut gemeten, namelijk als bij een patiënt met coarctatio aortae verschil in bloeddruk aan beide armen verondersteld werd. De kwikmanometer bevindt zich in een standaard ter hoogte van de manchet. In deze standaard is tevens opgenomen een luchtreservoir, dat automatisch op spanning wordt gehouden. Een aan het reservoir bevestigde kraan maakt het mogelijk naar believen lucht in de manchet te laten stromen of te laten ontwijken, zodat men gemakkelijk een bepaald gebied op de kwikmanometer kan aftasten. [1])

[1]) Deze bloeddrukmeter, die bij het Philips' Gezondheidscentrum algemeen wordt gebruikt, werd ons welwillend ter beschikking gesteld.

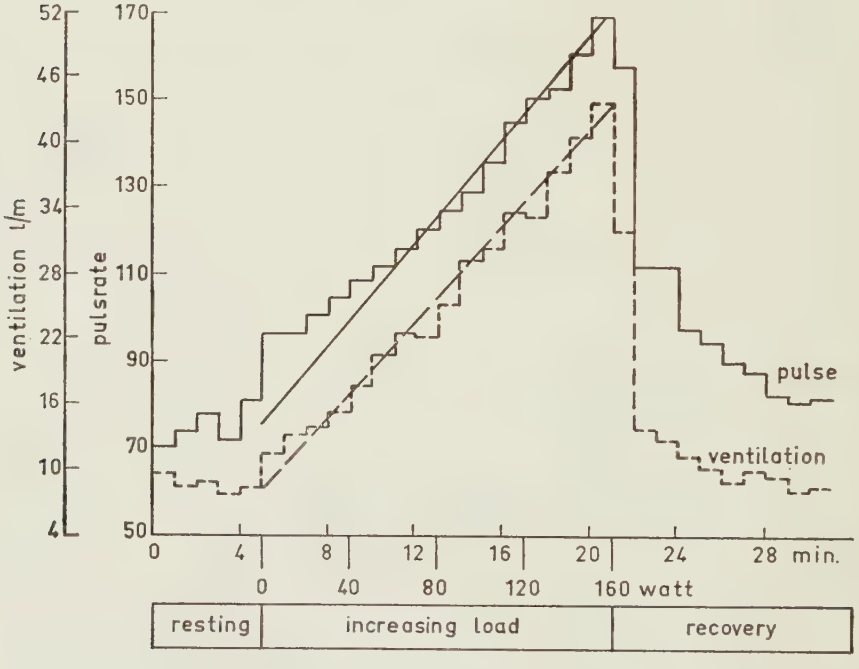
Hoofdstuk IV

BEPALING VAN HET LICHAMELIJK PRESTATIEVERMOGEN UIT DE FUNCTIEPROEF

A. Beschrijving van de gebruikte criteria

1. *De ventilatie-prestatie-index* (V.P.I.)

Bij de bestudering van de ademhaling tijdens arbeid (Bonjer (1958)) bleek een zodanige samenhang te bestaan tussen de ventilatie en de arbeidsbelasting, dat wij dit verband hebben gemeend te mogen uitdrukken in een index, de zogenaamde ventilatie-prestatie-index.



758

Fig. 5 Polsfrequentie en ventilatie tijdens de functieproef.
Toenemende belasting op de fietsergometer van 0 tot 100 watt, toename van de belasting 10 watt per minuut.
Langs de ordinaat: de polsfrequentie in slagen per minuut en de ventilatie in liters per minuut.
Langs de abscis: de tijd in minuten en de belasting in watts.

Dit is de toename van het ademminutenvolume (ventilatie in liters per minuut) per toename van de belasting met 10 watt.

In figuur 5 is het ademminutenvolume uitgezet langs de ordinaat; langs de abscis het aantal minuten en het aantal watts tijdens de opklimmende belasting. De rechte stippellijn geeft de gemiddelde toename van het ademminutenvolume weer. Deze rechte wordt op het oog zo goed mogelijk door de meetpunten getrokken. Uit de gemiddelde toename van het ademminutenvolume, weergegeven door deze rechte, gedeeld door de toename van de belasting over hetzelfde traject, kan men de toename van het ademminutenvolume per 10 watt toename van de belasting berekenen.

De bepaling van de ventilatie-prestatie-index is bij een aantal proefpersonen verricht ter verkrijging van de gemiddelde normale waarde. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

TABEL 1 De ventilatie-prestatie-index bij proefpersonen van verschillende leeftijd

mannen								vrouwen	
leeft.	V.P.I.	leeft.	V.P.I.	leeft.	V.P.I.	leeft.	V.P.I.	leeft.	V.P.I.
13	2,88	21	1,86	25	2,20	35	1,93	17	2,19
16	2,98	22	1,60	27	2,14	38	2,35	17	2,19
17	2,57	22	1,97	29	1,93	39	2,66	22	2,48
17	2,94	22	2,40	31	2,42	41	2,39	23	2,31
18	2,91	23	2,19	31	2,42	48	2,49	24	1,93
19	2,03	23	2,41	33	2,39	53	2,31	27	2,09
19	2,21	23	2,53	34	1,92	60	2,32	27	2,21
19	2,25	25	2,20	34	2,16	61	1,87	45	2,32
19	2,32								

De getallen zijn verkregen bij proefpersonen, die niet speciaal voor lichamelijke prestaties getraind zijn, maar die wel dagelijks van en naar hun werk fietsen. Er blijkt geen geslachtsverschil en geen verband met de leeftijd aantoonbaar te zijn. Het gemiddelde lichamelijk prestatievermogen van deze groep proefpersonen wordt door ons als norm gebruikt.

Het gemiddelde bedraagt 2.2 (s 0,27) liter per 10 watt toename van de belasting.

Vindt men bij een patiënt, dat de toename van de ventilatie 4.4 l bedraagt per 10 watt toename van de belasting, dan wordt het lichamelijk prestatievermogen volgens het criterium van de ventilatie-prestatie-index berekend als $\frac{2.2 \times 100}{4.4} = 50\%$.

2. *De arbeidsbelasting bij polsfrequentie 170* (Arb. 170)

De gedachte om het lichamelijk prestatievermogen te bepalen door te meten welke prestatie verricht moet worden om een polsfrequentie van 170

slagen per minuut te bereiken is ontleend aan SJÖSTRAND (1941).

Volgens dit criterium werd het prestatievermogen van een aantal proefpersonen bepaald. Dit materiaal werd uitgebreid met gegevens uit de literatuur (ÅSTRAND (1952), WAHLUND (1948), SZAKALL (1944)). Vervolgens werd nagegaan in hoeverre er een correlatie bestond tussen de belasting bij een polsfrequentie van 170 enerzijds en de lengte, het gewicht en het oppervlak anderzijds. De beste correlatie bleek te bestaan tussen het gewicht van de proefpersonen en het aldus door ons berekende prestatievermogen. Bij volwassen mannen bleek de belasting in watts bij een polsfrequentie van 170 te voorspellen door het lichaamsgewicht in kg te vermenigvuldigen met een factor 3,04 (s 0,34). Bij volwassen vrouwen bedroeg deze 2,33 (s 0,28) watt per kg lichaamsgewicht. Bij jonge kinderen bestaat een veel kleiner verschil tussen de beide sexen wat het aantal watts per kg lichaamsgewicht betreft. In de puberteit gaat het lichamelijk

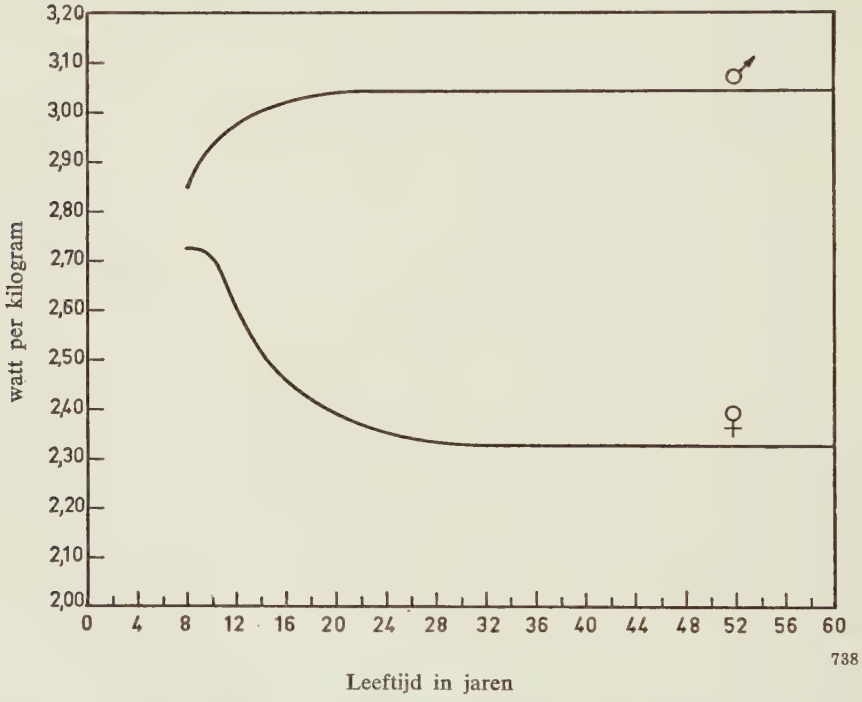


Fig. 6 Het aantal watts per kilogram lichaamsgewicht, dat verricht kan worden bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut, op verschillende leeftijd volgens tabel 3 (kolom 5).

prestatievermogen uitgedrukt in watts per kilogram voor de beide geslachten duidelijk verschillen (zie fig. 6). Dit verschil berust op een relatief

grotere toename van het vetweefsel bij de vrouw in de puberteitsjaren, terwijl bij de man het spierweefsel relatief meer toeneemt. Het lichamelijk prestatievermogen ten opzichte van de zogenaamde „lean body mass" blijft echter vrijwel gelijk (Von Döbeln (1956)). Onder de „lean body mass" wordt verstaan het lichaamsgewicht verminderd met het gewicht van het vetweefsel. De hoeveelheid vetweefsel kan worden gemeten door de proefpersoon boven en onder water te wegen. Hierbij dient men het volume van de residulucht in de ondergedompelde toestand te kennen. Uit het op deze wijze verkregen soortelijk gewicht van het lichaam en op grond van de kennis van het soortelijk gewicht van vetweefsel kan men de „lean body mass" bepalen. Om begrijpelijke redenen kan dit onderzoek niet bij patiënten gedaan worden.

Genoemde factor, vermenigvuldigd met het lichaamsgewicht, wordt gebruikt om het onder normale omstandigheden te verwachten prestatievermogen bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut te berekenen. De verhouding van dit getal en de werkelijk gevonden waarde geeft het prestatievermogen van de onderzochte weer.

In tabel 3 (kolom 5) en figuur 6 is het aantal watts per kg lichaamsgewicht, dat verricht kan worden bij een polsfrequentie van 170, voor mannen en vrouwen van verschillende leeftijd weergegeven.

Wordt bij een mannelijke patiënt van 70 kg een polsfrequentie van 170 waargenomen bij een arbeidsbelasting van 107 watt dan is het prestatievermogen volgens dit criterium:

$$\frac{\text{arb. } 170}{\text{gew.} \times \text{w/kg}} \times 100 = \frac{107}{70 \times 3{,}04} \times 100 = \frac{107}{213} \times 100 = 50\%$$

ten opzichte van het prestatievermogen, dat bij zijn geslacht en gewicht behoort.

3. *De pols-prestatie-index* (P.P.I.)

De pols-prestatie-index, die ontleend is aan de „Leistungs-Puls-Index" volgens Müller (1950), is de toename van de polsfrequentie bij een toename van de belasting met 10 watt.

Figuur 5 toont zulk een verband tussen de polsfrequentie en de oplopende belasting. Langs de ordinaat is de polsfrequentie in slagen per minuut uitgezet, op de abscis de tijd in minuten en de belasting in watts. Door de curve wordt een rechte lijn getrokken, die zo veel mogelijk door de meetpunten gaat. In ideale gevallen wordt het rustpolsniveau gesneden bij de belasting 0 en gaat de lijn door het punt, waar de eigenlijke curve het niveau van de polsfrequentie 170 slagen per minuut snijdt. Uit de lijn vindt men het aantal slagen, waarmee de polsfrequentie toeneemt per 10 watt toename van de belasting.

Müller heeft aangetoond, dat de polsfrequentietoename hetzelfde bleef bij een bepaalde proefpersoon of men de belasting met 10 watt of wel met 15 watt per minuut liet toenemen. Wij meenden bij patiënten de belasting

op de ergometerfiets met niet meer dan met 10 watt te mogen laten toenemen en vonden zelfs aanleiding de ergometer in te richten voor een toename van 5 watt per minuut.

De normale waarden, die MÜLLER voor zijn prestatie-pols-index heeft vastgesteld, hebben wij volledig kunnen bevestigen; ook het feit, dat er een goede correlatie bestaat tussen de toename van het lichaamsgewicht in de adolescentenleeftijd en de toename van het lichamelijk prestatievermogen volgens dit criterium (zie tabel 2).

TABEL 2

leeftijd	aantal	gewicht	P.P.I.
12 jaar	6 (4)	32 kg (36,7)	7,3 (6,95)
13 jaar	6 (15)	37 kg (39,6)	7,0 (6,59)
14 jaar	6 (27)	41 kg (44,8)	6,8 (5,96)
15 jaar	6 (26)	44 kg (50,3)	5,7 (5,41)
16 jaar	6 (14)	59 kg (57,7)	4,2 (4,78)

In deze tabel zijn achter de gegevens van MÜLLER getallen tussen haakjes weergegeven, die werden verkregen uit een eigen onderzoek van 48 ambachtsscholieren en 38 mannelijke leerlingen van een lyceum. MÜLLER berekent uit zijn getallen de correlatiecoëfficiënt van de pols-prestatie-index en het lichaamsgewicht ($r = -0{,}81$).

De samenhang tussen de arbeidsbelasting bij een polsfrequentie van 170 en de pols-prestatie-index bij verschillende leeftijden wordt weergegeven in tabel 3.

Tabel 3 is samengesteld op grond van eigen gegevens betreffende de rustpols bij jeugdige personen en volwassenen en gegevens van DE WIJN (1959) betreffende een onderzoek van de groeicurve van Nederlandse kinderen en uit gegevens van ÅSTRAND (1952), WAHLUND (1948) en SZAKALL (1944), die de rustpols, de maximale pols en de maximale arbeidsbelasting en het lichaamsgewicht van een aantal proefpersonen hebben gemeten.

In kolom 1 wordt de leeftijd in jaren opgegeven.

In kolom 2 wordt de rustpols zittend op de fiets weergegeven. Bij door ons onderzochte volwassenen bleek deze gemiddeld 84. Bij een groep personen tussen 12 en 18 jaar was de rustpols zittend op de fiets:

leeftijd	12	13	14	15	16	17	18
rustpols	90	94	91	92	79	95	79
aantal	8	29	43	27	13	6	1

De spreiding van de waargenomen getallen is groot, terwijl het waarnemingsmateriaal klein is. Om toch een inzicht te verkrijgen in het verloop van de rustpolsfrequentie op jeugdige leeftijd werden de aangegeven waar-

den gebruikt voor het construeren van een zo goed mogelijk representatieve lijn. Aan de ligging van deze lijn zijn de getallen in kolom 2 ontleend.

In kolom 3 is het verschil van de polsfrequentie 170 met de rustpolswaarde uit kolom 2 aangegeven. De gegevens van kolom 4 zijn gebaseerd op een normale groeicurve van het Nederlandse kind.

Kolom 5 werd verkregen uit gegevens van ÅSTRAND, WAHLUND en SZAKALL en geeft het aantal watts per kg lichaamsgewicht bij een polsfrequentie van 170 aan, zoals dit voor de door hen onderzochte personen gold (zie ook figuur 6).

In kolom 6 is aangegeven hoeveel watt bij een polsfrequentie van 170 geleverd zou kunnen worden door Nederlandse kinderen en volwassenen. De getallen zijn verkregen door het gemiddelde gewicht, dat geldt voor de Nederlandse bevolking te vermenigvuldigen met de getallen uit kolom 5.

Uit de gegevens van kolom 3 en kolom 6 is de prestatie-pols-index voor alle leeftijdsgroepen te berekenen. De uitkomsten worden gegeven in kolom 7.

TABEL 3

			mannen				vrouwen			
1	2	3	4	5	6	7	4	5	6	7
leeft.	rust Pf	170-rPf	gew.	w/kg	arb. 170	P.P.I.	gew.	w/kg	arb. 170	P.P.I.
8	102	68	25,4	2,85	72,4	9,58	25,0	2,72	68,0	10,00
9	100	70	27,6	2,90	80,0	8,76	26,3	2,72	71,5	9,78
10	98	72	30,2	2,93	88,5	8,12	29,4	2,71	79,7	9,03
11	96	74	32,5	2,96	96,2	7,68	33,3	2,67	88,9	8,32
12	94	76	36,7	2,98	109,4	6,95	37,4	2,61	97,6	7,78
13	92	78	39,6	2,99	118,4	6,59	42,3	2,56	108,3	7,18
14	90	80	44,8	3,00	134,1	5,96	48,0	2,52	121,0	6,62
15	88	82	50,3	3,01	151,4	5,41	50,5	2,48	125,2	6,53
16	87	83	57,7	3,01	173,7	4,78	53,2	2,43	130,9	6,34
17	86	84	60,9	3,02	183,9	4,57	55,1	2,42	133,3	6,28
18	85	85	63,8	3,02	192,7	4,41	56,4	2,41	135,9	6,26
19	85	85	65,2	3,03	196,9	4,32	58,7	2,40	140,9	6,02
20	84	86	65,9	3,04	200,3	4,29	58,7	2,39	140,3	6,11
21	84	86	68,6	3,04	208,5	4,12	59,9	2,38	142,6	6,02
22	84	86	69,5	3,04	211,3	4,07	57,4	2,37	136,0	6,32
23	84	86	69,6	3,04	211,6	4,06	58,6	2,36	138,3	6,20
24	84	86	69,1	3,04	210,1	4,09	60,2	2,35	141,5	5,82
25	84	86	70,3	3,04	213,7	4,02	61,6	2,34	144,1	5,87
25—60				3,04		4,01		2,33		5,74

De overeenkomst van de getallen uit tabel 3, kolom 7, met eigen meetresultaten wordt gedemonstreerd door de figuren 7 en 8.

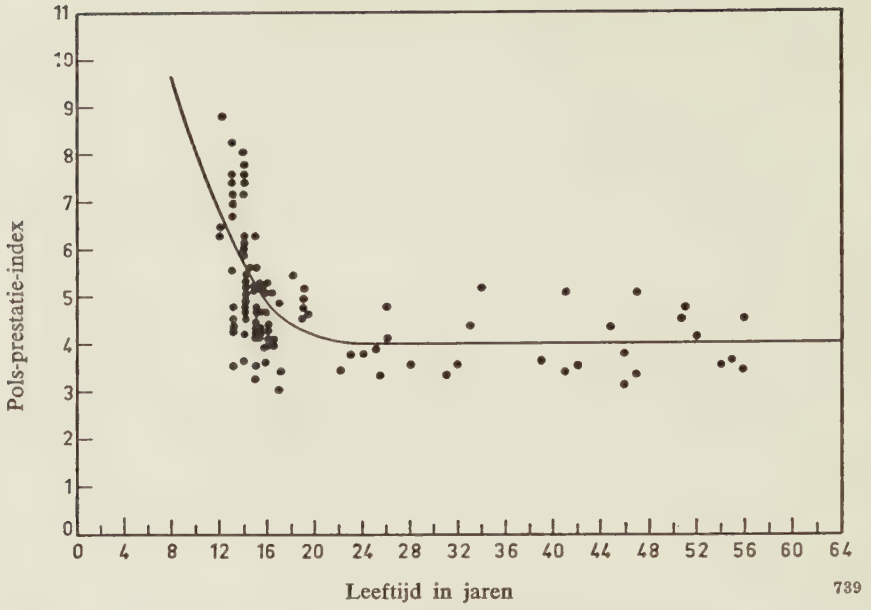


Fig. 7 Verband tussen leeftijd en pols-prestatie-index bij mannen.
De getrokken lijn is geconstrueerd uit de gegevens van kolom 7 in tabel 3.
De afzonderlijke punten hebben betrekking op eigen waarnemingen.

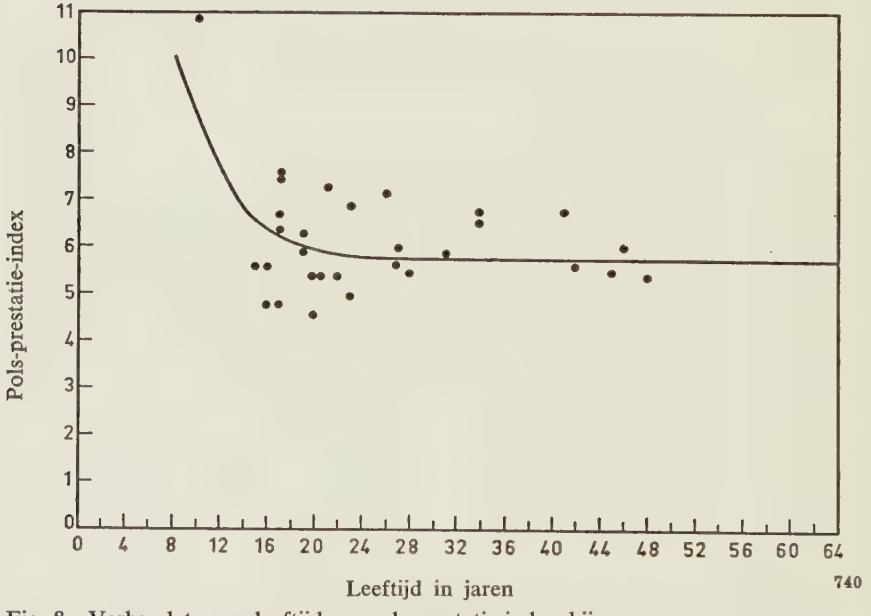


Fig. 8 Verband tussen leeftijd en pols-prestatie-index bij vrouwen.
De getrokken lijn is geconstrueerd uit de gegevens van kolom 7 in tabel 3.
De afzonderlijke punten hebben betrekking op eigen waarnemingen.

Uit beide figuren blijkt een goede overeenstemming tussen eigen waarnemingen en de op grond van kolom 7 van tabel 3 geconstrueerde lijn op volwassen leeftijd. Wij nemen derhalve voor mannen een normale waarde van 4.0 (s 0.34) en voor vrouwen van 5.7 (s 0.51) aan.

Wordt bij een mannelijke patiënt een toename van de polsfrequentie van 8 slagen per 10 watt toename van de belasting waargenomen dan is het quotiënt $\frac{\text{P.P.I. normaal}}{\text{P.P.I. patiënt}} \times 100 = \frac{4.0}{8} \times 100 = 50\%$. Wij zeggen dan, dat zijn lichamelijk prestatievermogen berekend volgens het criterium van de pols-prestatie-index 50% bedraagt van het prestatievermogen, dat bij zijn geslacht en leeftijd behoort.

B. *Bespreking van reeds genoemde en andere criteria*

De nauwkeurigheid van de gebruikte apparatuur werd reeds bij de beschrijving gegeven. De spreiding der waarnemingen wordt echter niet alleen bepaald door de nauwkeurigheid van de meetapparatuur doch ook door de *spreiding der physiologische functies*. Ten einde een inzicht te krijgen in de invloed van de combinatie van de genoemde factoren werd bij een zestal proefpersonen zes- tot achtmaal de volledige functieproef herhaald. De coëfficiënt van variatie van iedere gemeten grootheid is aangegeven in tabel 4. Bovendien is de gemiddelde waarde opgegeven voor de ventilatie-prestatie-index, de bij een polsfrequentie van 170 behorende arbeidsbelasting en de pols-prestatie-index. Voorts is de zuurstofschuld genoemd, die nog nader omschreven zal worden.

Tabel 4

Proef-persoon	V.P.I.	Arb. 170	P.P.I.	Gemiddeld	Zuurstof-schuld
I	12,4%	15,1%	9,1%	12,2%	19,2%
II	12,2%	14,3%	10,4%	12,3%	37,8%
III	11,1%	7,2%	10,0%	9,4%	27,9%
IV	10,2%	5,9%	6,3%	7,5%	24,1%
V	14,4%	11,5%	9,8%	11,9%	32,1%
VI	15,2%	3,1%	6,1%	8,1%	21,6%

In tabel 4 zijn de gemiddelde waarden gegeven van de coëfficiënt van variatie van de verschillende criteria. Het blijkt dat de grootheden afgeleid van de polsfrequentie de minste spreiding tonen, terwijl de zuurstofschuld het minst nauwkeurige criterium is.

Bij het toepassen van de genoemde criteria ventilatie-prestatie-index en pols-prestatie-index wordt gebruik gemaakt van speciaal grafiekpapier, waarop de waarnemingen van flowmeter en cardiotachometer voor iedere

minuut worden genoteerd (zie figuur 5). Het ideale beeld zou een niveau tonen tijdens rust, een lineaire stijging tijdens het oplopen van de belasting en een vloeiende terugkeer na de arbeid tot het oorspronkelijke rustniveau, welke volgens sommige auteurs (LEHMANN (1953)) exponentieel zou zijn. Afwijkingen van dit ideale verloop kunnen voorkomen in alle drie phasen. Zo kan het rustniveau onder invloed van nervositeit door onbekendheid met de proef of door andere factoren worden beïnvloed. De ventilatie schijnt minder te worden beïnvloed dan de polsfrequentie.

Bij het begin van de inspanning ziet men vaak een verschijnsel dat wij wel met „opsprong" aanduiden. De polsfrequentie neemt dan in de aanvang meer toe dan men op grond van het latere verloop verwacht. In het algemeen blijft de pols in de eerste vijf minuten, zij het ook in steeds mindere mate, boven de later te trekken lijn. Ook de ventilatie toont vaak zulk een opsprong. Deze werd onder meer door DEJOURS (1956) beschreven en door hem als reflectoire reactie verklaard.

Ook ziet men wel bij de hoogste belasting een onevenredig grote stijging van polsfrequentie en/of ventilatie. Dit phenomeen werd door MÜLLER beschreven voor de polsfrequentie en door hem als een vermoeidheidsverschijnsel geduid. Het kan in dergelijke gevallen moeilijk blijken op verantwoorde wijze een rechte door de meetpunten in de grafiek te trekken. Ten aanzien van de terugkeer der beide grootheden na het beëindigen van de inspanning kan worden opgemerkt, dat het soms geruime tijd blijkt te duren alvorens de rustwaarde wordt bereikt. Dit geldt vooral voor de polsfrequentie.

Het criterium voor het prestatievermogen, dat ontleend wordt aan de arbeidsbelasting, waarbij een polsfrequentie van 170 per minuut bestaat, is moeilijk toe te passen wanneer een dergelijke polsfrequentie niet werkelijk bereikt wordt. Het lijkt geoorloofd de genoemde rechte in de grafiek te extrapoleren totdat deze het niveau van de polsfrequentie van 170 snijdt, indien er geen twijfel behoeft te bestaan over de juiste ligging van deze rechte en wanneer de werkelijk bereikte polsfrequentie niet minder bedraagt dan 150. Een andere moeilijkheid bij het gebruik van dit criterium ontstaat indien tijdens de proef een polsfrequentie van 170 slagen bereikt is, maar in een vroeger stadium dan op grond van de getrokken rechte mocht worden verwacht. Wij menen in dergelijke gevallen, die op zichzelf een aanduiding zijn, dat men de zoëven genoemde extrapolatie slechts over een kort traject mag verrichten het criterium te moeten betrekken op de belasting, waarbij de polsfrequentie van 170 slagen per minuut werkelijk wordt bereikt. In deze gevallen zal de uitkomst van de pols-prestatie-index en die van de arbeidsbelasting bij een polsfrequentie van 170 verschillen, ondanks het feit dat beide criteria aan dezelfde grootheid, de polsfrequentie, zijn ontleend.

Ook op andere wijze kan een discrepantie optreden tussen het lichamelijk prestatievermogen gebaseerd op de beide criteria. Immers de normale

waarde, waarmee steeds vergeleken wordt bij de berekening van het percentage, is in het ene geval gebaseerd op geslacht en leeftijd en in het andere geval op geslacht en lichaamsgewicht. Het zal duidelijk zijn dat adipositas aanleiding zal geven tot een minder gunstige beoordeling van het prestatievermogen volgens het criterium van de polsfrequentie 170.

Tenslotte moge gewezen worden op het feit dat de pols-prestatie-index aangeeft op welke wijze de polsfrequentie stijgt bij toenemende belasting, zonder dat het niveau waarop dit verband tot uitdrukking wordt gebracht invloed heeft op de uitkomsten. Met andere woorden: bij een lage rustpolsfrequentie en een relatief laag blijven van de polsfrequentie tijdens inspanning kan een normale pols-prestatie-index gevonden worden, terwijl het criterium volgens een polsfrequentie van 170 slagen per minuut een groter lichamelijk prestatievermogen aangeeft in vergelijking tot de pols-prestatie-index.

Bij het beoordelen van kinderen en adolescenten speelt vooral in de puberteit het verschil tussen de chronologische en de biologische leeftijd een grote rol. Werkend met normen voor een bepaalde leeftijd krijgt men bij een in groei achtergebleven kind of een tot een bijna volwassen gestalte uitgegroeide adolescent van dezelfde leeftijd grote verschillen. Het is mogelijk aan de hand van tabel 3 het lichamelijk prestatievermogen zowel te berekenen volgens de leeftijd als volgens het lichaamsgewicht.

De *zuurstofschuld* is de hoeveelheid zuurstof, die het verschil vormt tussen de voor de arbeid benodigde en de tijdens de arbeid opgenomen hoeveelheid zuurstof. Wanneer bij een functieproef een constante belasting wordt toegepast, zal zich gedurende de eerste minuten van de proef een zuurstofschuld ontwikkelen afhankelijk van de mate van inspanning. Deze zuurstofschuld wordt in de eerste minuten van de herstelphase ingelost en openbaart zich dan door een grotere zuurstofopname dan met de stofwisseling in rust overeenkomt. Ook bij proeven met opklimmende belasting kan dit inlossen van de zuurstofschuld na afloop van de inspanning gemeten worden. Indien het circulatieapparaat beperkingen oplegt aan de zuurstofopname en het transport naar de weefsels, zal de zuurstofschuld tijdens arbeid abnormaal groot worden. Door vergelijking van de werkelijk gevonden zuurstofschuld met de op grond van de geleverde inspanning te verwachten zuurstofschuld, kan men een inzicht krijgen in de mate van beperking der zuurstofopname en aldus in het prestatievermogen. Mutatis mutandis kan dezelfde gedachtengang gevolgd worden voor beperking van de ventilatie en het diffusievermogen.

De zuurstofschuld wordt berekend door de zuurstofopname over de eerste tien minuten na het staken van de inspanning te verminderen met tienmaal het gemiddelde bedrag van de zuurstofopname in rust vóór de inspanning.

De zuurstofschuld bij gezonde proefpersonen blijkt in een verband te staan tot de arbeidsbelasting (zie figuur 9). Het lichamelijk prestatiever-

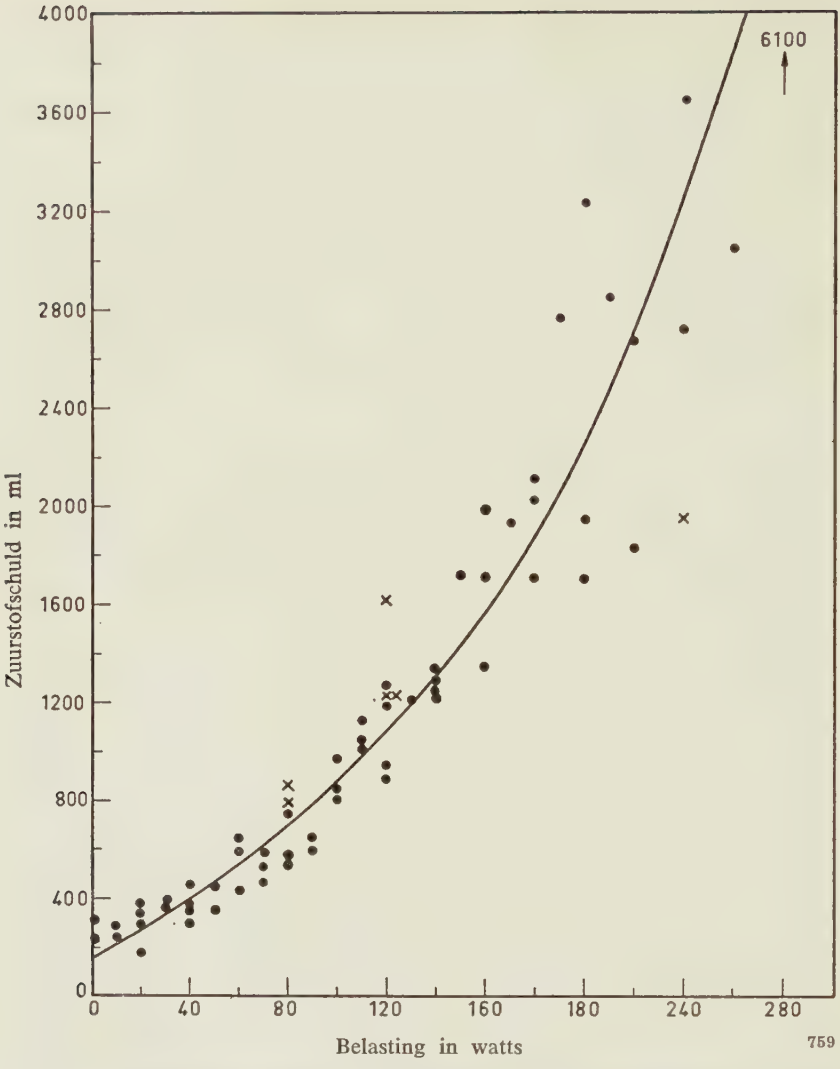


Fig. 9 Verband tussen belasting en zuurstofschuld bij de proefpersonen uit appendix I en II.

• Zuurstofschuld na het verrichten van een constante belasting (appendix II).
x Gemiddelde zuurstofschuld van zes proeven met opklimmende belasting bij dezelfde proefpersoon (appendix I).

mogen van patiënten volgens het criterium van de zuurstofschuld kan dus worden gevonden uit de bij hen gevonden zuurstofschuld en de blijkens figuur 9 te verwachten normale waarde.

Vindt men bij een patiënt een zuurstofschuld van 1000 ml bij een be-

lasting van 80 watt dan kan men het lichamelijk prestatievermogen van de patiënt volgens dit criterium uitdrukken in procenten van de normale waarde door middel van de formule:

$$\frac{\text{normale zuurstofschuld voor 80 watt}}{\text{gemeten zuurstofschuld voor 80 watt}} = \frac{700}{1000} \times 100 = 70\%,$$ waarbij het getal 700 gevonden wordt uit de grafiek in figuur 9.

Zoals reeds uit tabel 4 bleek is de zuurstofschuld als criterium voor het lichamelijk prestatievermogen minder waardevol dan de andere door ons gebruikte criteria, omdat de spreiding van de waarnemingen ongeveer 27% is en die van de andere criteria ongeveer 10%.

Zoals wij in het voorgaande zagen wordt bij belastingsproeven arbeid geleverd en wordt gemeten welke physiologische reacties er optreden. Het verband tussen zuurstofopname en uitwendige mechanische arbeid wordt *efficiëntie,* nuttig effect of rendement genoemd.

De efficiëntie wordt berekend door de geleverde uitwendige arbeid te delen door de zuurstofopname. Men kan daartoe beide grootheden in calorieën uitdrukken.

Het warmteaequivalent voor 1 wattminuut is 0,014327 kcal.

Het calorische aequivalent voor 1 liter zuurstof is afhankelijk van het respiratorisch quotiënt en bedraagt bijvoorbeeld 4,82 bij een R.Q. van 0,82 (zie tabellen van CARPENTER (1949)).

Men spreekt van de netto efficiëntie, indien het zuurstofverbruik van de proefpersoon in rust van de zuurstofopname tijdens arbeid wordt afgetrokken voor de berekening van de efficiëntie.

Op de hierboven beschreven wijze werd de netto efficiëntie berekend voor ongetrainde proefpersonen, die telkens gedurende tien minuten arbeid verrichtten op de Lanooy fietsergometer met verschillende belastingen. De gevonden waarden blijken uit tabel 5:

TABEL 5

Belasting	Aantal proefpersonen	Netto efficiëntie in %
30 w	10	23,1 s 1,1
60 w	18	22,4 s 2,1
90 w	13	25,3 s 1,7
120 w	9	21,1 s 1,7
180 w	9	20,6 s 1,6

De netto efficiëntie bedraagt bij fietsarbeid volgens de gegevens uit tabel 5 gemiddeld 22,4 (s 2,2) %.

Ook uit proeven met opklimmende belasting kan men de mechanische efficiëntie berekenen. Bij opklimmende belasting werd een gemiddelde toename van de zuurstofopname gemeten van 132 (s 13) ml per 10 watt toename van de belasting. De efficiëntieberekening geeft: 22,5 (s 2,2) %.

De opklimmende belasting heeft dus dezelfde efficiëntie als de continue belasting. Ook hieruit blijkt, dat in feite een reeks van steady states wordt doorlopen bij proeven met opklimmende belasting. Immers wanneer de steady state-waarde tijdens de toenemende belasting niet zou worden bereikt, zou er een schijnbaar gunstige efficiëntie worden gevonden bij de proeven met opklimmende belasting.

Wij hebben ons in den beginne afgevraagd in hoeverre de efficiëntie bij patiënten zou afwijken van die bij gezonden en of het meten van de efficiëntie een graadmeter voor het prestatievermogen zou zijn. Hoewel de theoretische grondslag gezond schijnt, heeft deze methode nooit practische waarde verkregen. Dit moge blijken uit tabel 6:

Tabel 6

(aantallen)	30 w	60 w	90 w	120 w
norm. proefp. (36)	23,1 s 0,98 (8)	22,4 s 2,15 (13)	25,3 s 1,21 (7)	21,1 s 1,7 (8)
patiënten (44)	22,4 s 3,11 (18)	22,3 s 2,35 (15)	22,8 s 2,21 (5)	21,3 s 3,01 (6)

Een verklaring voor deze overeenkomst van de efficiëntie van proefpersonen en hartpatiënten kan gevonden worden in de volgende overweging:

De stofwisseling van het hart bedraagt, zowel in rust als tijdens inspanning, ongeveer 4% van de totale stofwisseling. Bij de patiënt, die een zodanige hartafwijking heeft, dat de hartarbeid dientengevolge tweemaal zo groot zal moeten zijn, bedraagt de stofwisseling van het hart ongeveer 8% van de totale stofwisseling. De spreiding van de gemeten stofwisseling bij verschillende proefpersonen tijdens dezelfde inspanning bedraagt echter reeds ongeveer 12%. Verschillen in de efficiëntie gaan dus gemakkelijk verloren als gevolg van deze spreiding.

Het meten van het *hartminutenvolume* tijdens inspanning teneinde een indruk te krijgen tot welke waarde deze grootheid kan worden opgevoerd zou leiden tot de opzet van een hartfunctieproef in de ware zin van het woord. Een dergelijke hartfunctieproef zou, bij een normale ventilatie, een normale diffusie, een normaal haemoglobinegehalte en een normale utilisatie hiervan, tevens kunnen worden gebruikt als een methode ter bepaling van het lichamelijk prestatievermogen. Dit werd immers gebaseerd op het maximale vermogen tot opnemen en transporteren van zuurstof.
Lijkt dus de meting van het hartminutenvolume tijdens inspanning van belang bij het beoordelen van cardiologische patiënten, de practische uitvoering heeft grote bezwaren. Reeds eerder werd gezegd, dat het doen verrichten van maximale inspanning voor patiënten niet verantwoord is. Daarnaast geldt het bezwaar dat de meest betrouwbare methode ter bepaling van het hartminutenvolume de kennis van het zuurstofgehalte van

gemengd veneus bloed vordert en dat dit slechts door middel van een hartcatheter uit de arteria pulmonalis kan worden verkregen. Toch was er een reden een poging te wagen uit gegevens, die tijdens de inspanningsproef op onbloedige wijze zijn te verkrijgen, een schatting te maken omtrent het hartminutenvolumen. Dit leek van belang, omdat een gelijk zuurstofverbruik bij proefpersonen en hartpatiënten bij eenzelfde belasting een verschillend hartminutenvolumen nog niet uitsluit. Het was denkbaar, dat de hartpatiënt een kleiner hartminutenvolume zou compenseren met een grotere zuurstofutilisatie van het bloed.

Dit streven heeft geresulteerd in een berekeningsmethode, die gebaseerd is op de vergelijking van FICK (1870).

$$\dot{Q} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{C_a - C_{\bar{v}}}$$

Zoals eerder werd uiteengezet is de zuurstofopname $\dot{V}_{O_2}$ continu te registreren met flowmeter en diaferometer. Voor het vinden van de factor $C_a - C_{\bar{v}}$, het verschil in zuurstofgehalte van arterieel en gemengd veneus bloed, kan gebruik worden gemaakt van het goede verband tussen deze factor en de polsfrequentie in de steady state bij verschillende intensiteiten van inspanning, zoals dit blijkt uit gegevens gepubliceerd door DONALD, BISHOP, CUMMING en WADE (1955), LINDHARD (1915), ASMUSSEN en NIELSEN (1955) en DEXTER (1951). Deze gegevens zijn uitgezet in fig. 10.

Indien het mogelijk zou zijn door het nulpunt een lijn te trekken, die goed correspondeert met de uitgezette meetpunten, dan zou men een eenvoudige betrekking hebben gevonden tussen beide grootheden. Een poging daartoe is gedaan in fig. 10. Volgens deze lijn zou de door COURNAND (1941) gemeten zogenaamde basale waarde voor de factor $C_a - C_{\bar{v}} = 4.3 \pm 0.4$ vol% overeenkomen met een polsfrequentie van 60 slagen per minuut, een aanvaardbare waarde voor een toestand van volkomen rust.
De genoemde betrekking kan dus worden uitgedrukt door de formule:

$$\frac{(C_a - C_{\bar{v}})}{(C_a - C_{\bar{v}})_{bas}} = \frac{Pf}{Pf_{bas}}$$

Voor $(C_a - C_{\bar{v}})_{bas}$ zullen wij steeds 4.3 vol% moeten invullen, doch voor de basale polsfrequentie kan men een meer individuele waarde vinden, indien men voor de betreffende persoon de polsfrequentie tegen de zuurstofopname uitzet en extrapoleert naar de basale zuurstofopname, die men in de tabellen van CARPENTER (1939) kan opzoeken.

Het hartminutenvolumen tijdens arbeid kan aldus geschat worden met de formule:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{43} \times \frac{Pf_{bas}}{Pf}$$

In figuur 17 wordt een voorbeeld gegeven van de toepassing van deze berekeningsmethode. De resultaten moeten echter met terughoudendheid worden bezien, omdat de gebruikte correlatie tussen polsfrequentie en arterio-veneus verschil in zuurstofgehalte slechts bij gezonden is aangetoond.

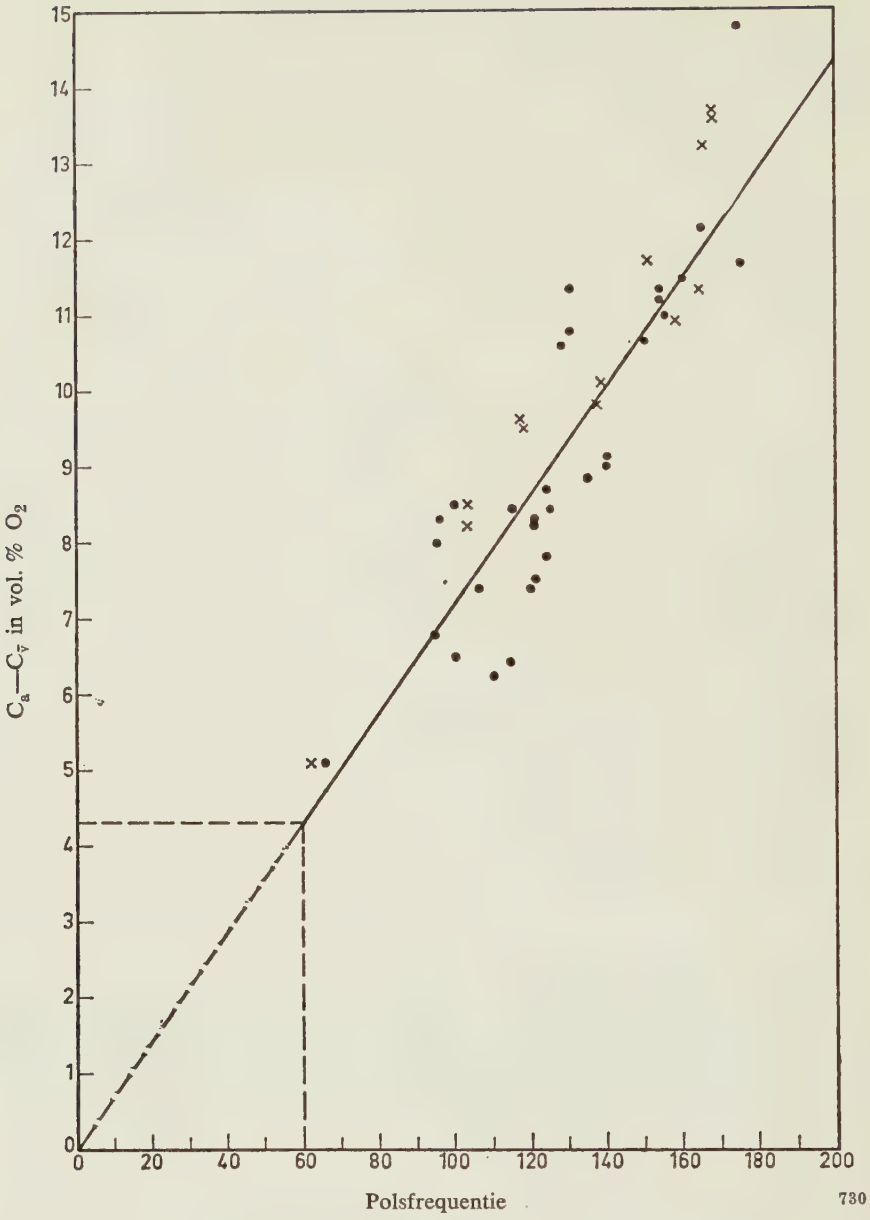


Fig. 10 Het verband van de polsfrequentie en het arterio-veneuze zuurstofconcentratieverschil volgens metingen van Donald, Bishop, Cumming en Wade (1955), Lindhard (1915), Asmussen en Nielsen (1955) en Dexter (1951).

• Fick methode.
x Acetyleenmethode

In hoofdstuk I werd ook het *zuurstofdiffusievermogen* van de longmembraan een criterium voor het lichamelijk prestatievermogen genoemd. Immers ook een verminderde diffusie kan als beperkende factor optreden.

De hoeveelheid zuurstof, uitgedrukt in ml., die per minuut en per mm Hg verschil in zuurstofspanning tussen alveolaire lucht (P_A) en bloed in de longcapillairen ($P_{\bar{c}}$) bij een bepaalde toestand van het organisme door de longmembraan gaat, wordt de diffusiecapaciteit genoemd.

$$D_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{P_A - P_{\bar{c}}}.$$

Voor de alveolaire zuurstofspanning P_A kan men de partiële zuurstofspanning in eind-exspiratielucht als beste benadering nemen. Voor het schatten van de gemiddelde zuurstofspanning in capillair bloed in de longen werd een grafische methode uitgewerkt en vermeld in Appendix III. Daar hierbij het zuurstofgehalte van gemengd veneus bloed moet volgen uit de hiervoor beschreven relatie tussen polsfrequentie en arterio-veneus verschil in zuurstofgehalte, is hier dezelfde beperking aanwezig, namelijk dat deze benaderende methode niet behoeft op te gaan bij patiënten.

Bij patiënten werd derhalve uitsluitend de zuurstofdiffusiecapaciteit in rust berekend en wel op grond van gegevens van de hartcatheterisatie. P_A wordt nu verkregen uit de verzadiging van bloed, waarvan de zuurstofspanning in evenwicht is met die in de alveolus. Het zuurstofgehalte van gemengd veneus bloed kon nu rechtstreeks worden gemeten.

Op het verband tussen de uitkomst van deze laatste soort berekeningen en andere criteria wordt in Hoofdstuk V teruggekomen.

Indien op het *electrocardiogram* bij een ijkuitslag van 5 mm per mV, een ST-daling van meer dan 1 mm optreedt of indien rhythmestoornissen, bijvoorbeeld een reeks extra-systolen, optreden wordt de functieproef beëindigd.

Genoemde verschijnselen worden beschouwd als een gevolg van verminderde zuurstofvoorziening van de hartspier. De aard van de electrocardiografische bevindingen tijdens deze functieproeven zullen door J. Th. Ch. Vonk Jr. worden beschreven.

Het optreden van electrocardiografische verschijnselen bij een bepaald belastingsniveau kan als criterium voor het lichamelijk prestatievermogen gelden, wanneer zij optreden, voordat er andere verschijnselen van een verminderd prestatievermogen zijn.

De waarden voor het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de verschillende criteria komen in het algemeen overeen. Er kan echter een *discrepantie* optreden tussen de waarde voor het lichamelijk prestatievermogen bepaald uit de meting van het ademminutenvolume en die uit de meting van de polsfrequentie.

Indien vergroting van de functionele dode ruimte van de longen bestaat,

zal de toename van het ademminutenvolume relatief groter zijn dan de toename van de polsfrequentie. De waarden voor het lichamelijk prestatievermogen, vastgesteld uit de toename van het ademminutenvolume of uit de toename van de polsfrequentie, zijn in deze gevallen dus verschillend.

Bij atriumfibrillatie en ook bij extrasystolie van wat hogere frequentie zijn sommige slagen van het hart niet effectief door onvoldoende slagvolume. Er bestaat dan een verschil tussen de hartfrequentie en de polsfrequentie. Ook in deze gevallen vindt men discrepantie tussen de waarden, die men voor het lichamelijk prestatievermogen vindt uit de toename van het ademminutenvolume of uit de toename van de hartfrequentie.

Het lichamelijk prestatievermogen is afhankelijk van de *trainingstoestand* van de onderzochte. Indien de belastingsproef op achtereenvolgende dagen wordt uitgevoerd veroorzaakt de belasting zelf reeds enige training. Het effect wordt gedemonstreerd in tabel 7, die de gemiddelde waarden van het prestatievermogen, berekend uit de pols-prestatie-index en ventilatie-prestatie-index van de zes proefpersonen van appendix I, geeft.

Tabel 7

Proefpersoon	I	II	III	IV	V	VI	gem.	gem. zonder III
Proef 1	108	90	102	97	97	106	100	100
2	119	89	113	109	105	93	105	103
3	112	96	119	100	96	111	106	103
4	113	100	100	111	94	98	103	103
5	119	100	108	106	103	104	107	106
6	112	99	121	107	117	108	111	109
7	119	89	101	110	110	102	105	106
8	125	105	100	109	100	106	108	109
9			92		108	111		
10			100					

Opgemerkt dient te worden, dat proefpersoon III ten tijde van de zevende, achtste en negende proef een verkoudheid doormaakte. Indien men de gegevens van proefpersoon III niet meerekent, neemt het aldus berekende lichamelijk prestatievermogen met iets meer dan een procent per keer toe.

De invloed van aan de proef *voorafgaande inspanning* werd onderzocht door de functieproef herhaalde malen uit te voeren. Een proefpersoon herhaalde de test van 0 tot 240 watt zevenmaal op één dag, ieder volgend uur opnieuw beginnend (ter onderlinge vergelijking zijn de gemiddelde waarden van V.P.I. enz. op 100% gesteld) (tabel 8).

Er is geen systematische verandering in de tijd in een van de geobserveerde grootheden te constateren. Een duidelijke afname van het aldus bepaalde lichamelijk prestatievermogen bij toenemende vermoeidheid blijkt niet aanwezig.

TABEL 8

tijd	V.P.I. in % van het gemiddelde	O_2 schuld in % van het gemiddelde	arb. 170 in % van het gemiddelde	P.P.I. in % van het gemiddelde	gemiddelde van V.P.I. en P.P.I. in % van het gemiddelde
8.30	106	140	110	116	111
9.30	95	95	111	108	102
10.30	112	110	103	94	103
11.30	91	99	105	101	96
12.30	100	68	88	101	101
13.30	102	135	88	105	104
14.30	93	52	93	82	88
m	100	100	100	100	
s	7,52	32,4	9,95	10,86	

Hoofdstuk V

DE WAARDE DER GEBRUIKTE CRITERIA BIJ DE BEOORDELING VAN CARDIOLOGISCHE PATIËNTEN

1. *Correlaties tussen de ventilatie-prestatie-index, de perifere longvaatweerstand en de diffusiecapaciteit van de longen*

In figuur 11 en 12 is het met behulp van de ventilatie-prestatie-index berekende lichamelijk prestatievermogen in procenten van de normale waarde uitgezet langs de abscis. Alle waarnemingen betreffen patiënten met mitraalstenose.

Langs de ordinaat is weergegeven de logarithme van de longvaatweerstand, zoals die bij catheterisatie in rust bij dezelfde patiënt in dezelfde week werd gemeten op de afdeling Cardiologie.

De longvaatweerstand wordt berekend uit

$$P_R = 80 \frac{(APcm - APpm)}{\dot{Q}} \text{ dynes. sec. cm}^{-5}$$

APcm = gemiddelde druk in de arteria pulmonalis in mm Hg.
APpm = gemiddelde druk in de longcapillairen in mm Hg.
$\dot{Q}$ = hartminutenvolume in liters per minuut.
80 = factor voor omrekening van druk in mm Hg in dynes. cm^{-2}, van minuten in seconden en van liters tot cm^3 ($1{,}36 \times 981 \times 60 \times 10^{-3}$).

De correlatiecoëfficiënt tussen het aldus berekende lichamelijk prestatievermogen en de logarithme van de perifere longvaatweerstand bij deze patiënten met mitralisstenose bedroeg bij 12 mannen $r = -0{,}90$ en bij 16 vrouwen $r = -0{,}93$ (beide significant, $P < 0{,}001$).

Verhoging van de perifere longvaatweerstand gaat blijkbaar samen met verhoging van het ademminutenvolume. Nagegaan werd of bij vermeerderde ventilatie en verhoogde longvaatweerstand ook een verlaagde diffusiecapaciteit zou bestaan.

De diffusiecapaciteit van de longen werd in deze gevallen berekend uit de waarnemingen tijdens de catheterisatie, dus in rust.

Bij de catheterisatie werd de saturatie van het bloed perifeer in de arteria pulmonalis $S_{C'}$ bepaald („wedged catheter"). De bij deze saturatie behorende zuurstofspanning van het bloed werd uit de standaard dissociatiecurve afgelezen. Deze zuurstofspanning benadert de alveolaire zuurstofspanning P_A. De verzadigingswaarde van het gemengd veneuze bloed $S_{\bar{v}}$ is die van het bloed uit het centrale deel van de arteria pulmonalis. Uit deze

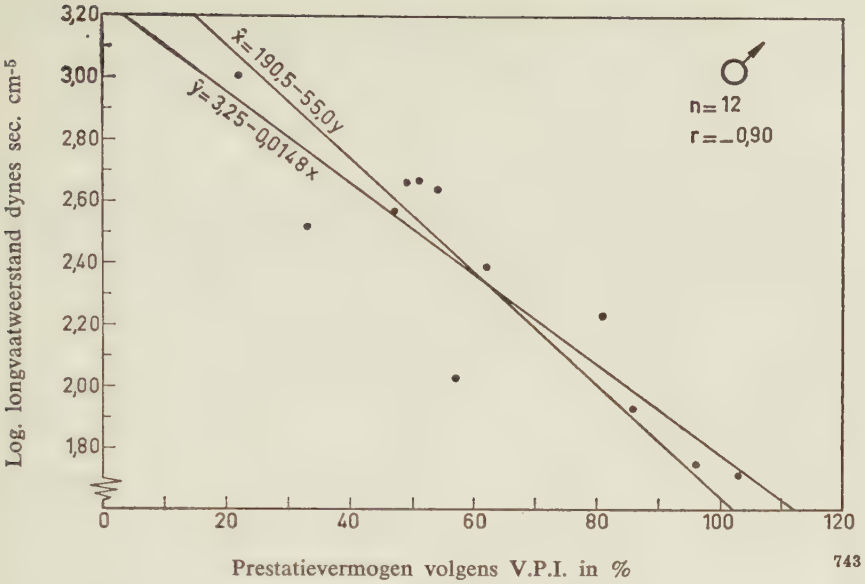


Fig. 11 Correlatie tussen het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de ventilatie-prestatie-index en de capillaire longvaatweerstand bij mitraalstenose.

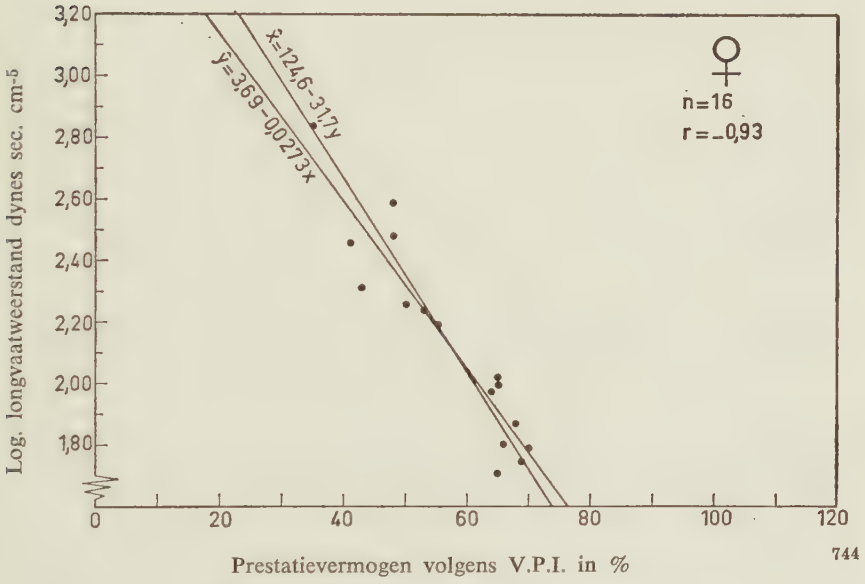


Fig. 12 Correlatie tussen het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de ventilatie-prestatie-index en de capillaire longvaatweerstand bij mitraalstenose.

waarden voor P_A en $S_{\bar{v}}$ kan met behulp van een grafische methode $P_{\bar{c}}$ worden gevonden en hieruit met de gemeten zuurstofopname de diffusiecapaciteit worden berekend:

$$D_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{P_A - P_{\bar{c}}}$$

De gebruikte grafische methode wordt beschreven in appendix III.

De logarithme van de longvaatweerstand en de diffusiecapaciteit in rust in ml zuurstof per minuut per mm Hg toonden een correlatiecoëfficiënt r = —0,777 (n = 77, significant, P ≪ 0,001) (fig. 13).

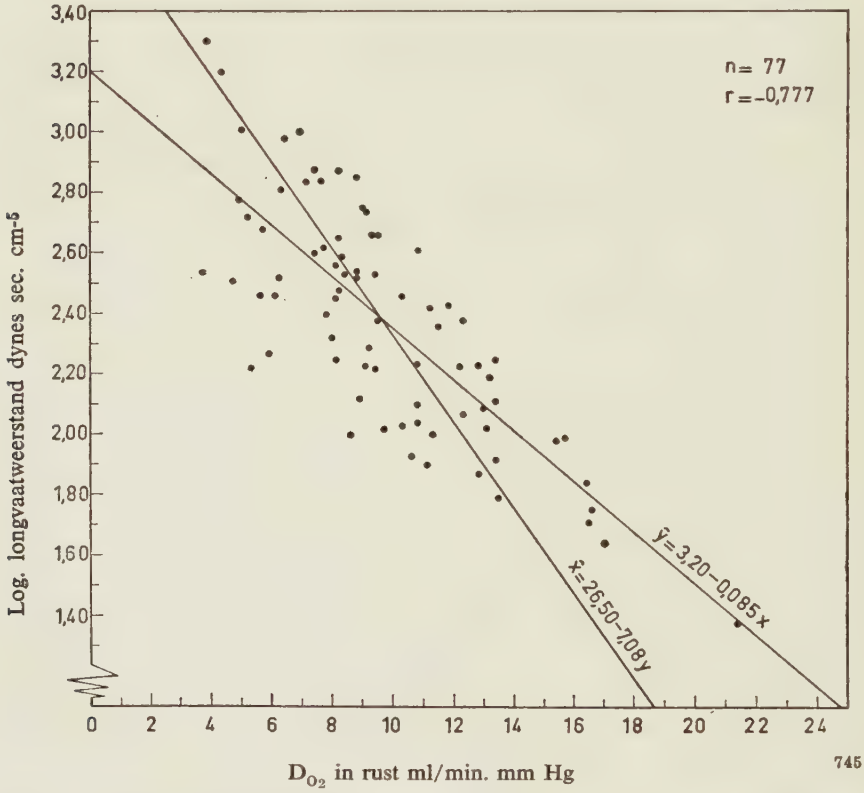


Fig. 13 Correlatie tussen diffusiecapaciteit en capillaire longvaatweerstand bij patiënten met mitraalstenose.

Uit dezelfde gegevens werd ook de correlatiecoëfficiënt berekend tussen de diffusiecapaciteit in rust en het lichamelijk prestatievermogen volgens de ventilatie-prestatie-index r = 0,71 (n = 47, significant, P ≪ 0,001) (fig. 14).

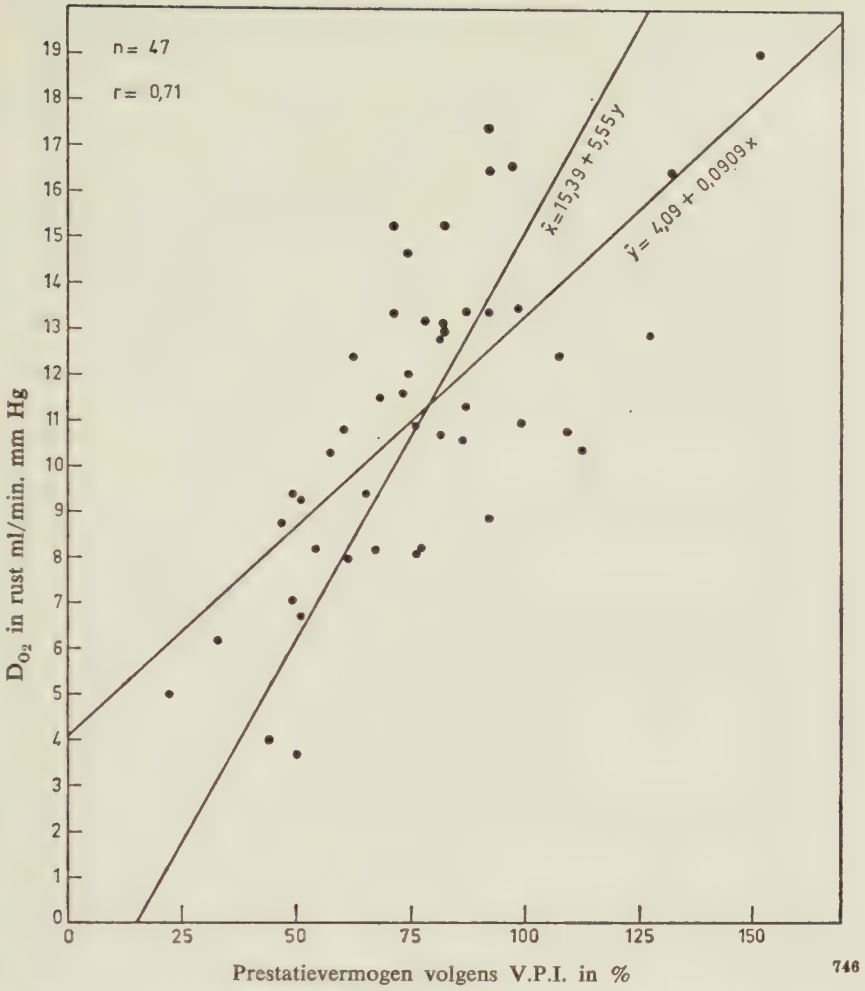


Fig. 14 Correlatie tussen het lichamelijk prestatievermogen op grond van de ventilatie-prestatie-index en de diffusiecapaciteit bij patiënten met mitraalstenose.

Op grond van bovenstaande berekeningen blijkt er inderdaad een correlatie te bestaan tussen de zuurstofdiffusiecapaciteit enerzijds en de perifere longvaatweerstand en de ventilatie-prestatie-index anderzijds.

2. *Correlaties tussen de pols-prestatie-index en de ostiumgrootte bij patiënten met mitraalstenose en met pulmonaalstenose*

In figuur 15 is het verband weergegeven tussen de grootte van het ostium mitrale en het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-

prestatie-index in procenten. Beide werden in dezelfde week bepaald bij patiënten met mitraalstenose.

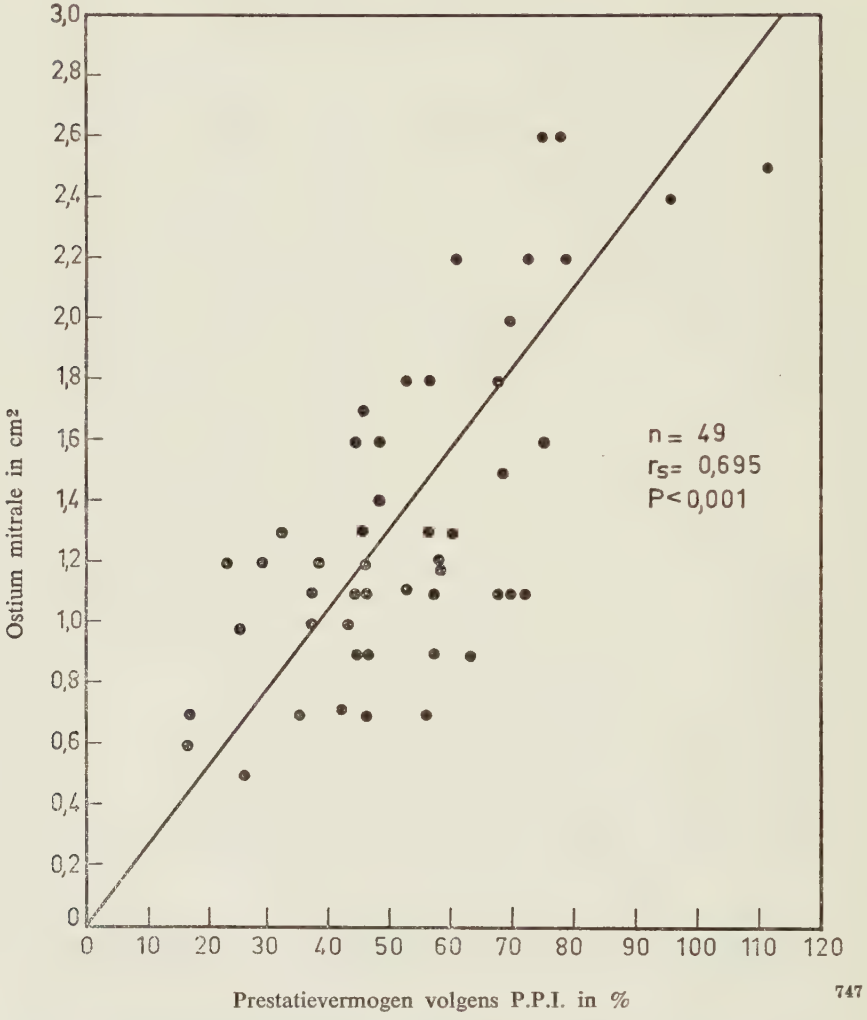


Fig. 15 Relatie van het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-prestatie-index en het oppervlak van het ostium mitrale bij patiënten met mitraalstenose.

De grootte van het ostium mitrale werd met behulp van de formules van Gorlin en Gorlin (1951) berekend uit gegevens van de hartcatheterisatie.

In principe wordt het ostium beschouwd als een haemodynamische weer-

stand, waarvan de waarde is te berekenen uit de stroom, die door het ostium vloeit en het drukverschil voor en achter deze vernauwing:

(I) $$MVA = \frac{MVF}{31\sqrt{PCm - 5}}$$

waarin MVA (mitral valve area) de grootte van het ostium in cm^2 weergeeft en MVF (mitral valve flow) de stroom door het ostium in cm^3/sec. voorstelt. De bloedstroom door het mitraalostium (MVF) is te berekenen uit het hartminutenvolume en de tijd gedurende welke bloed door het ostium stroomt. Deze tijdsfactor is de diastolische vullingsperiode (dfp), die wordt weergegeven in seconden per minuut. De stroom door het mitraalostium kan worden berekend uit de formule:

(II) $$MVF = \frac{\dot{Q}}{dfp}$$

PCm stelt de gemiddelde druk in de long„capillairen" uitgedrukt in mm Hg voor. De druk in de linker kamer aan het eind van de diastole wordt gesteld op 5 mm Hg.

Het getal 31 in de eerste formule is empirisch vastgesteld door GORLIN en GORLIN. Door RODRIGO (1953) werd berekend, dat hier slechts bij benadering van een constante sprake is en dat het gebruik beperkt dient te worden tot kleine ostia van regelmatige vorm. Na operatie vermindert de betrouwbaarheid van dit getal, doordat niet alleen de grootte van het ostium is toegenomen, maar ook de vorm is veranderd.

Er blijkt een correlatie te bestaan tussen het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-prestatie-index en de grootte van het mitraalostium. De rangorde-correlatie volgens SPEARMAN $r_s = 0{,}695$ (significant $P < 0{,}001$).

Figuur 16 geeft de relatie weer tussen de grootte van het ostium pulmonale bij patiënten met pulmonalis stenose en het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-prestatie-index.

De rangorde-correlatie volgens SPEARMAN bedraagt bij 16 patiënten met pulmonaalstenose 0,888 (significant, $P < 0{,}01$). Hieronder kwam in 11 gevallen de valvulaire, in 2 gevallen de infundibulaire vorm en in 3 gevallen een combinatie van beide vormen voor. Neemt men de 11 gevallen van valvulaire stenose tezamen dan is de rangorde-correlatie met de grootte van het ostium 0,896 (significant, $P < 0{,}01$).

De grootte van het ostium pulmonale wordt op een zelfde manier berekend als de grootte van het mitraalostium. Er wordt bij deze berekening een andere constante gebruikt. Bij de valvulaire stenose geeft deze berekening een goede benadering wegens de bekende vorm van deze stenose. Bij de infundibulaire stenose daarentegen is men van de vorm van de stenose niet zeker, waardoor de berekening niet altijd betrouwbaar is.

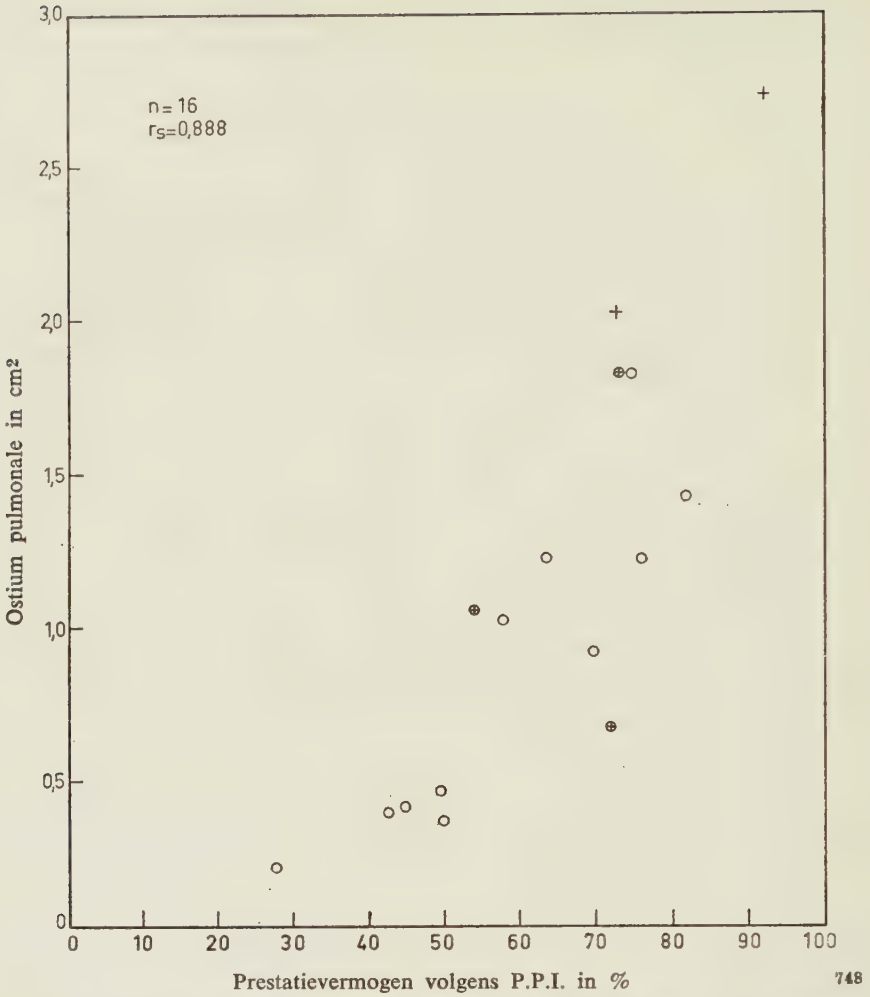


Fig. 16 Relatie van het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-prestatie-index en het oppervlak van het ostium pulmonale bij patiënten met pulmonaalstenose.

o valvulair
\+ infundibulair
⊕ valvulair plus infundibulair

3. *Bloeddrukmetingen en de mate van vernauwing van de aorta bij coarctatio aortae*

Bij dertien patiënten met coarctatio aortae, die geopereerd werden, werd de vernauwing aan het operatiepreparaat gemeten. In tabel 9 zijn in de laatste kolom de lengte en breedte van het kleinste lumen in millimeters weergegeven.

TABEL 9

Nummer	Intra-arteriële druk in rust	Bloeddruk volgens Riva Rocci in rust	Syst. druk bij het begin van de arbeid	Toename van de syst. druk per 10 w toename van de bel.	Lengte en breedte van het kleinste lumen in mm	
1	155/75	150/90	156	5,7	3,0	3,0
2	180/90	200/78	197	2,2	4	4
3	198/96	195/110	193	3,4	0,5	0,5
4	155/65	220/110	192	9,3	1,5	1,5
5	160/80	180/100	168	5,1	3,5	3,5
6	160/95	160/100	168	6,1	2,5	2,5
7	160/78	160/95	191	1,9	1,5	2
8	160/78	180/95	111	3,9	1	1
9	148/42	175/120	172	4,2	0	0
10	200/70	170/95	185	5,0	1	1,9
11	190/85	180/110	161	3,0	0	0,1
12	175/90	155/70	152	4,8	2	4
13	190/90	170/105	152	6,0	2	3

Er is geen correlatie tussen de intraärterieel gemeten bloeddruk in rust of de met de manchet gemeten bloeddruk in rust, of de systolische bloeddruk als beginwaarde van de inspanningsproef (tijdens onbelast fietsen op de ergometer) en de toename van de systolische bloeddruk in mm Hg per 10 watt toename van de belasting aantoonbaar. Het volkomen gebrek aan een correlatie tussen de afmetingen van het lumen op de vernauwde plaats en de bloeddruk moet wellicht verklaard worden uit het verschil in omvang van de collaterale circulatie bij deze patiënten.

4. *Electrocardiografie en haemodynamische bevindingen*

De electrocardiografische veranderingen tijdens inspanning zullen door J. TH. CH. VONK JR. worden beschreven.

Aan een voorlopige mededeling over electrocardiografische veranderingen door inspanning bij mitraalstenose (VONK (1956)) wordt het volgende ontleend:

Bij mitraalstenose kunnen in het electrocardiogram dezelfde afwijkingen optreden als bij coronairinsufficiëntie gedurende en/of na inspanning. Deze afwijkingen zijn extrasystolie (meestal ventriculair) en/of daling van het ST-segment. Zij worden gevonden bij patiënten met een sinusrhythme, maar ook in gevallen van atriumfibrillatie.

Zij zijn aanwezig in ongeveer twee derde van een serie van patiënten met sinusrhythme en zuivere mitraalstenose met een oppervlak van het mitraalostium van 1,6 cm^2 of minder (berekend na catheterisatie van het rechter hart en/of gemeten door de chirurg). Zij werden nooit gezien in gevallen waar het mitraalostium groter was dan 1,6 cm^2.

5. *De berekende cardiac output tijdens de inspanningsproef*

In hoofdstuk IV B werd een benaderende methode gegeven voor de berekening van de cardiac output. De meetgegevens, die hiertoe gebruikt worden, zijn zuurstofopname en polsfrequentie. Uit de polsfrequentie wordt het arterioveneuze zuurstofconcentratieverschil in de longen bij benadering verkregen. Uit zuurstofopname gedeeld door arterioveneus zuurstofconcentratieverschil volgt de cardiac output, of in formule gebracht:

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{V}_{O_2}}{\frac{Pf}{Pf_{bas}}(C_{c'} - C_{\bar{v}})_{bas}}$$

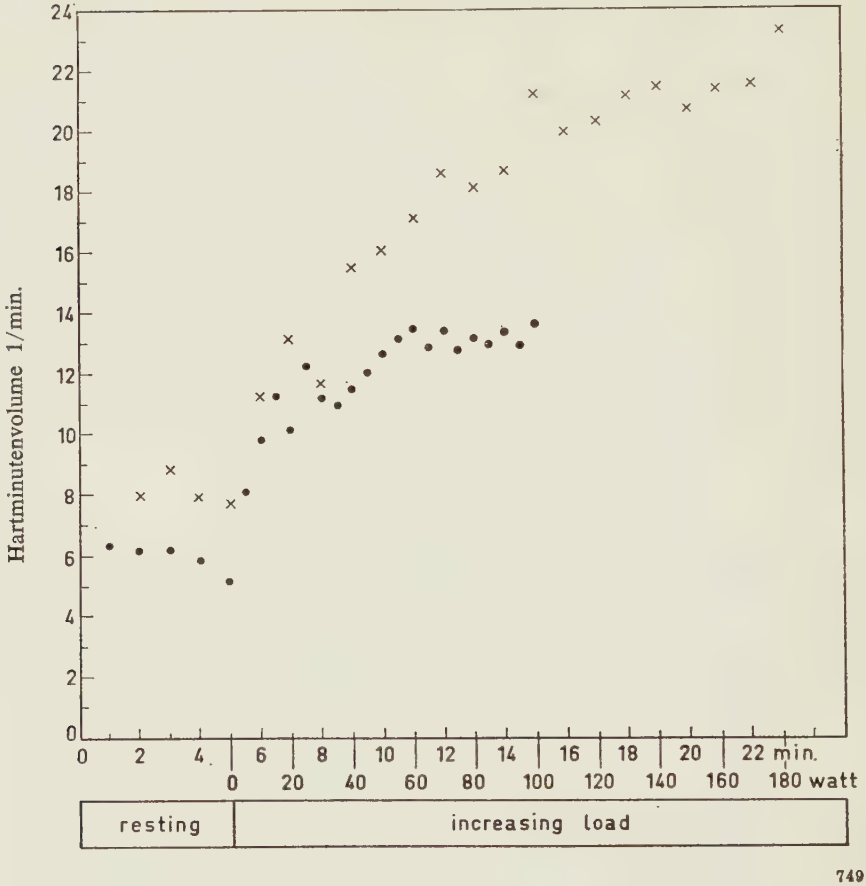


Fig. 17 Het berekende hartminutenvolume van een patiënt met mitraalstenose gedurende de fietsproef met opklimmende belasting voor en na operatie.

• 3 maanden voor operatie
× 15 maanden na operatie

In figuur 17 worden de meetpunten weergegeven van een patiënt met mitraalstenose berekend uit waarnemingen drie maanden voor en vijftien maanden na operatie. Vóór de operatie ligt de curve van de cardiac output bij deze patiënt in zijn geheel lager en lijkt deze een plafond te bereiken. Na de operatie is de cardiac output zowel in rust als tijdens inspanning normaal en neemt deze op een normale wijze toe.

Voor de operatie bedroeg het lichamelijk prestatievermogen van deze patiënt op grond van de resultaten van de functieproef uit de ventilatie-prestatie-index 61%, uit de arbeidsbelasting bij polsfrequentie 170 53%, uit de pols-prestatie-index 44%. Na de operatie waren deze getallen respectievelijk 100%, 83% en 85%.

De cardiac output-berekening werd slechts in een beperkt aantal gevallen uitgevoerd, omdat deze in feite berust op een polsfrequentie — zuurstofopname relatie of, omdat de mechanische efficiëntie een betrekkelijk constant getal is, een polsfrequentie — belasting relatie, die reeds wordt weergegeven in de pols-prestatie-index. Bovendien is de bruikbaarheid van de gevolgde methode van berekening niet aangetoond voor patiënten.

Hoofdstuk VI

HET LICHAMELIJK PRESTATIEVERMOGEN BIJ VERSCHILLENDE CARDIOLOGISCHE PATIËNTEN GEGROEPEERD VOLGENS DE DIAGNOSE

I. *Mitraalstenose*

In tabel A zijn waarnemingen van 30 patiënten met mitraalstenose voor en na de operatie samengebracht. De eerste observatie vond plaats voor de operatie, de tweede zoveel maanden na de operatie als in de tweede kolom is aangegeven. Het lichamelijk prestatievermogen volgens de ventilatie-prestatie-index toont op een drietal waarnemingen na een stijging. De gemiddelde stijging is van 53% vóór tot 73% na de operatie. Deze stijging is subjectief voor deze patiënten van het grootste belang, omdat dit minder dyspnoe tijdens inspanning voor hen betekent. Het lichamelijk prestatievermogen, berekend uit de polsfrequentie, is niet zo groot als die berekend uit de ventilatiewaarden, dit houdt verband met het blijven bestaan van atriumfibrillatie, indien deze voor de operatie reeds aanwezig was. In de groep van tabel A is er een toename van het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de arbeid, die verricht kan worden bij polsfrequentie 170, van 42% voor operatie tot 58% na de operatie en indien berekend uit de pols-prestatie-index van 42% tot 60%. Ondanks de grote betekenis, die de vermindering van de dyspnoe bij inspanning voor hem heeft, blijft de patiënt, die geopereerd is wegens mitraalstenose, over het algemeen ongeschikt voor zwaar lichamelijk werk. Uit deze tabel komt wel in sterke mate het belang van een individuele beoordeling van de patiënt tot uiting.

In tabel B is een groep van 27 patiënten met mitraalstenose samengebracht, die over een langere tijd gevolgd konden worden. Het zijn andere patiënten dan die van tabel A. De observatie voor de operatie viel voor 1 September 1954, het tijdstip waarop de flowmeter met integrator ter beschikking kwam en waarna het ademminutenvolume tijdens arbeid gemeten kon worden. Daarom wordt van deze patiënten alleen het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-prestatie-index weergegeven. Eerst het getal van voor de operatie, dan verdeeld over tijdvakken van ongeveer een half jaar de verandering der percentages. Waarschijnlijk komt de patiënt met blijvende klachten vaker terug voor controle dan degene die klachtenvrij is geworden. Mede hierdoor is het patiëntenmateriaal geselecteerd en dus niet representatief.

TABEL A Mitraalstenose. Observatie voor en na de operatie

Alle getallen duiden op het lichamelijk prestatievermogen uitgedrukt in procenten ten opzichte van de bij gezonden te verwachten waarden.

Nummer	Tweede obs. aantal mnd. na operatie	V.P.I. Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %	Arb. 170 Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %	P.P.I. Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %
599	6	17	+25	39	—11	39	—12
126	12	69	—12	89	+ 6	66	+ 9
327	12	55	+23	39	+42	54	+23
277	14	35	+42	24	+ 4	21	+11
313	18	43	+37	41	+22	43	+14
359	34	49	+24	41	+17	39	+34
373	19	45	+39	31	— 1	37	+11
693	16	38	+39	42	+ 4	71	—20
323	28	33	+ 7	38	+10	33	+ 6
668	12	67	+ 7	65	+ 9	58	+25
410	12	75	— 2	60	+43	50	+39
612	16	51	+45	38	+52	31	+43
718	11	66	+ 5	51	+22	49	+19
706	8	56	+11	67	—23	62	—15
387	9	48	+17	23	+24	24	+11
623	10	52	+42	15	+22	38	+27
298	15	61	+39	53	+30	44	+41
680	10	52	+20	78	+20	57	+17
740	12	74	0	32	+16	38	+12
746	11	73	+ 1	32	+18	38	0
494	12	46	+20	20	+37	40	+39
611	12	53	+ 3	37	—17	43	—15
341	9	54	+32	65	+ 2	53	+ 8
745	10	65	+ 9	59	+10	38	+ 6
581	14	49	+22	15	+ 4	26	+ 1
747	12	56	—10	50	—13	43	0
533	12	57	+30	52	+16	49	+19
586	22	14	+42	14	+ 8	20	+ 5
624	19	57	— 4	29	+54	20	+32
433	28	45	+36	23	+52	24	+36
n=30		m=53%	+20 (73%)	42%	+16 (58%)	42%	+18 (60%)

Voor de operatie bedroeg het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de pols-prestatie-index bij deze groep gemiddeld 46%; de toename bedroeg gemiddeld in de eerste twee jaar na de operatie ongeveer 20%, dus tot 66%. Drie van deze groep van 27 patiënten bereikten weer ongeveer de normale waarden, zeventien van hen kwamen boven de 60% en een van hen bleef onder de 40%.

In tabel E zijn patiënten met verschillende diagnosen samengebracht, die slechts eenmaal zijn geobserveerd. De hierin voorkomende patiënten

Tabel B Mitraalstenose. Observatie voor en na de operatie van het prestatievermogen uit de pols-prestatie-index met tussenpozen van een half jaar. De toename is steeds weergegeven ten opzichte van de waarde voor de operatie.

Nummer	% Voor	Na ½	1	1½	2	2½	3	3½	4	4½	5 jaar
200	38		+19								
163	32	+23	+17								
148	65			+36						+11	
719	43			+ 9							
140	76		— 3		+17						
180	69	+ 8	+19		+18				+12		
230	34	+35									
186	56	+ 6	+27				+47				
42	33		+10	+ 2	— 4						
196	42			+20							
25	37				+35						
169	55		+ 1								
164	35	+17	+59								
276	40				+26	+25					
102	46	+22		+57							
103	47	+12	+ 7								
242	51								+15		
88	43	+16	+18								
235	66		— 4	+18							
9	48		+ 3								
87	36	+35		+38							+ 9
502	27		+37								
104	62	— 3	+ 7								
174	64	+10			+13						
7	24			+50		+45					
158	46		+27	+28							
132	24		+25	+63							
n=27	m=46	+17	+17	+32	+18						

met mitraalstenose werden in vijf groepen ingedeeld. De eerste groep omvat 116 patiënten, die onder de diagnose mitraalstenose gestuurd werden. De gemiddelde waarden voor het lichamelijk prestatievermogen liggen wat hoger dan die bij de patiënten van tabel A voor de operatie. Dit moet wel veroorzaakt zijn door het feit, dat tot deze patiënten van tabel E ook diegenen behoren, die slechts een lichte mitraalstenose hebben en die niet voor operatie in aanmerking komen.

De tweede groep omvattende 44 patiënten betreft diegenen, die uitsluitend na de operatie werden onderzocht. De waarden zijn respectievelijk 68, 59 en 57%. Ter beoordeling van de verbetering dienen deze niet met de 116 niet geopereerde patiënten met mitraalstenose van tabel E te worden vergeleken, immers daaronder vielen ook de lichte gevallen, die niet voor operatie in aanmerking kwamen. Wel kan men een vergelijking

maken met de waarden voor de operatie van de patiënten van tabel A of B respectievelijk 53, 42, 42 of 46%. Hieruit zou dan een verbetering na de operatie blijken van gemiddeld respectievelijk 15, 17 en 15 of 11%, wat dan weer redelijk overeenstemt met de toename van de waarden bij de patiënten van tabel A of B.

Regel 3 geeft een groep van 31 patiënten met de combinatie van mitraalstenose en mitraalinsufficiëntie weer. Het gemiddelde lijkt iets lager dan van de patiënten met mitraalstenose van regel 1.

Regel 4 vermeldt een groep van 38 patiënten met mitraalstenose gecombineerd met een aorta-vitium.

Regel 5 geeft een groep van 9 patiënten weer met mitraalstenose gecombineerd met andere vitia.

II. *Pulmonaalstenose*

Tabel C en regel 6 tot en met 10 van tabel E betreffen patiënten met pulmonaalvitia.

TABEL C Pulmonaalstenose. Observatie voor en na de operatie

Nummer	Tweede obs. aantal mnd. na operatie	V.P.I. Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %	Arb. 170 Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %	P.P.I. Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %
322	27	41	+14	45	+21	45	+22
297	12	45	+11	52	+12	50	+ 8
607	13	38	+40	66	—10	54	+13
785	6	73	+11	75	+20	73	+20
468	13	83	+11	57	+13	67	+17
377	20	65	+ 4	75	+15	43	+ 8
518	6	71	+35	90	+21	54	+22
572	9	88	+13	79	+19	60	+13
632	12	56	+34	93	—12	74	— 3
265	16	74	+32	45	+ 7	50	+ 4
507	14	72	+ 6	60	+15	38	+21
692	14	68	+ 9	60	—22	87	—47
762	13	61	+39	69	+31	61	+26
777	9	29	+49	28	+46	28	+36

De patiënten van tabel C zijn allen geopereerd wegens valvulaire pulmonaalstenose. Een korte beschrijving over deze veertien patiënten, ontleend aan hun ziektegeschiedenis volgt hieronder. Naast de klinische gegevens is het rekenkundige gemiddelde van het lichamelijk prestatievermogen berekend uit de ventilatie-prestatie-index, uit de arbeidsbelasting bij de polsfrequentie 170 slagen per minuut en uit de pols-prestatie-index in procenten van de normale waarde gegeven. Het getal van voor en na de operatie wordt vermeld. Op deze wijze is bij de patiënten met pulmonaalstenose een voorbeeld gegeven hoe men het aldus geschat lichamelijk prestatievermogen in verband kan brengen met de klinische gegevens. De mitraalstenose leent zich hiertoe veel minder, omdat daarbij

veelal een aandoening van het myocard bestaat. Vooral de atriumfibrillatie heeft veel invloed op de uitslag van de functieproef.

322. A.B.W.-G., huisvrouw van 49 jaar.

Sinds haar twaalfde jaar heeft patiënte een dyspnoe d'effort, die na een bronchitis, toen zij 43 jaar oud was, progressief werd. Zij kan alleen lichte huishoudelijke werkzaamheden verrichten.

Het electrocardiogram vertoont rechtsdraaiing van de electrische as, geen duidelijke rechtshypertrophie. Het phonocardiogram vertoont een ruitvormig systolisch geruis met een laat maximum doorlopend door de eerste component van de tweede toon. Het kleine pulmonaaldeel ligt 0,10 seconden na het aortadeel.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is 130/0, in de arteria pulmonalis 14/5. De arteriële zuurstofverzadiging is 87%. Het ostium wordt op 0,4 cm^2 geschat.

De diagnose is valvulaire pulmonaalstenose met een open foramen ovale. Het lichamelijk prestatievermogen bedraagt voor de operatie op grond van de resultaten van de functieproef 44%.

Operatie 9-2-'55 volgens Brock.

27 maanden na operatie zijn haar klachten duidelijk verminderd.

Volgens het electrocardiogram is de rechtsdraaiing van de electrische as duidelijk verminderd, in de precordiale afleidingen is een klokwijze rotatie te constateren. Het phonocardiogram vertoont nog een gering protosystolisch geruis, de tweede toon is niet meer gespleten. Er is een klein protodiastolisch geruis.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is nu 55/0, in de arteria pulmonalis 25/9. De arteriële zuurstofverzadiging is ook bij inspanning volledig. Het ostium wordt nu geschat op ongeveer 1,3 cm^2.

Er is nog een geringe pulmonaalstenose.

Het lichamelijk prestatievermogen op grond van de resultaten van de functieproef bedraagt na de operatie 63%.

297. J.A.M. W., man, ten tijde van de operatie 20 jaar oud, van beroep inkoper.

Voor de operatie vermeldt de anamnese dyspnée d'effort. Hij kon nooit met zijn leeftijdsgenoten meedoen.

Het electrocardiogram geeft een compleet rechter bundeltakblock te zien. Het phonocardiogram vertoont een systolisch crescendo-decrescendo geruis met een laat maximum, dat voorbij de tweede toon loopt. Het pulmonale deel is klein en volgt 0,14 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel blijkt 145/0, de druk in de arteria pulmonalis 20/8 mm Hg. De arteriële zuurstofverzadiging bedraagt 85%. Het pulmonaalostium wordt geschat op 0,45 cm^2.

Diagnose: Valvulaire pulmonaalstenose met open foramen ovale. Op grond van de resultaten van de functieproef wordt het lichamelijk prestatievermogen geschat op 49%, voor de operatie.

Operatie: op 7-1-'55 wordt een valvulotomie volgens Brock gedaan.

Twee jaar na de operatie is de patiënt sterk verbeterd en kan nu alle inspanning goed verdragen, ook het zwemmen.

Het electrocardiogram vertoont nog een compleet rechter bundeltakblock, er zijn links precordiaal nu duidelijke R-toppen. Het phonocardiogram geeft nog een holosystolisch geruis te zien, dat decrescendo naar de tweede toon verloopt.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is nu 80/0, de druk in de arteria pulmonalis 10/2. De arteriële zuurstofverzadiging is volledig. Het pulmonaalostium wordt nu geschat op 1,1 cm^2.

Er is dus nog een duidelijk verhoogde druk in de rechter ventrikel.

Het lichamelijk prestatievermogen op grond van de resultaten van de functieproef bedraagt na de operatie 59%.

607. P.J.A. v. d. V., meubelmaker 36 jaar.

Sinds zijn jeugd heeft patiënt een cyanose, die bij inspanning verergert. Het laatste jaar is de kortademigheid bij inspanning veel sterker geworden. Hij heeft ook lichte angineuze klachten daarbij. Bij het lichamelijk onderzoek valt de sterke cyanose direct op.

Het electrocardiogram wijst op een duidelijke rechtshypertrophie. Het phonocardiogram toont een ruitvormig systolisch geruis met een laat maximum, dat door het aortadeel van de tweede toon heen loopt. Het pulmonale deel is niet duidelijk maar lijkt 0,04 seconden na het aorta-deel op te treden.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is 165/0, in de arteria pulmonalis 18/5. Het bloed in de arteria brachialis is voor 92% verzadigd.

De diagnose wordt gesteld op valvulaire pulmonaalstenose met een open foramen ovale. Voor de operatie bedraagt het lichamelijk prestatievermogen op grond van de resultaten van de functieproef 53%.

De operatie wordt op 4-1-'57 uitgevoerd onder hypothermie.

Dertien maanden na de operatie kan de patiënt veel meer doen en kan zijn werk goed verrichten.

Het electrocardiogram wijst uit, dat de rechtshypertrophie is verminderd, er bestaat nu een incompleet rechter bundeltakblock. Op het phonocardiogram is nog een ruitvormig systolisch geruis dat evenwel voor de tweede toon ophoudt. Het pulmonale deel van de tweede toon is nu duidelijk aanwezig en ligt 0,08 seconden na het aorta-deel. Er is nu een protodiastolisch geruisje. In de leverpolscurve zijn aanwijzingen voor een tricuspidaalinsufficientie.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is nog 70/0, in de arteria pulmonalis 22/10. De zuurstofverzadiging in het arteriële bloed is nu 96%.

Er is nog een matige pulmonaalstenose aanwezig.

Het lichamelijk prestatievermogen is na de operatie uit de resultaten van de functieproef 67%.

785. C. v. d. V.-G., huisvrouw van, tijdens de operatie, 26 jaar.

Voor de operatie kan patiënte wel fietsen, maar wordt bij tegenwind snel kortademig. Zij heeft nooit aan sport kunnen doen. Ook het trappenlopen valt haar wat moeilijk. Het electrocardiogram duidt op sterke rechtshypertrophie. Op het phonocardiogram bestaat een holosystolisch geruis, dat crescendo naar de tweede toon loopt; het pulmonaal deel der tweede toon is klein en valt 0,10 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel bedraagt 180/0 mm Hg, de druk in de arteria pulmonalis 25/9 mm Hg. Het pulmonaalostium wordt

geschat op 0,4 cm^2. De arteriële zuurstofverzadiging bedraagt 83%.

De diagnose luidt valvulaire pulmonaalstenose met open foramen ovale.

Op grond van de resultaten van de functieproef voor de operatie bedraagt het lichamelijk prestatievermogen 74%.

Op 15-1-'58 wordt een valvulotomie onder hypothermie verricht. Acht maanden na de operatie voelt patiënte zich veel verbeterd, zij heeft geen last van dyspnée d'effort meer.

Het electrocardiogram toont aan, dat de rechtshypertrophie belangrijk verminderd is; er bestaat nu een incompleet rechter bundeltakblock. Het phonocardiogram toont een geringe crescendo-decrescendo systolische souffle, die duidelijk eindigt voor de tweede toon. Er is geen splijting van de tweede toon meer, wel is er nu een gering protodiastolisch geruis.

De hartcatheterisatie en de arteriepunctie zijn nog niet herhaald.

Het prestatievermogen blijkt op grond van de resultaten van de functieproef na de operatie 91%.

468. J.G.M. v. d. P., leeftijd bij operatie 30 jaar, van beroep kapper.

Voor de operatie heeft patiënt twee maal een aanval van hartkloppingen gehad. Verder zijn er geen klachten.

Het electrocardiogram wijst op een duidelijke rechtshypertrophie. Het phonocardiogram geeft een systolisch crescendo-decrescendo geruis met een laat maximum te zien, doorlopend door de eerste component van de tweede toon. Het kleine pulmonaaldeel komt 0,10 seconden na het aorta-deel der tweede toon.

Hartcatheterisatie; De druk in de rechter ventrikel bedraagt 135/0, in de arteria pulmonalis 17/5 mm Hg. Het ostium wordt geschat op 0,9 cm^2. Het arteriële bloed blijkt volkomen verzadigd.

De diagnose wordt gesteld op valvulaire pulmonaalstenose. Het lichamelijk prestatievermogen op grond van de resultaten van de functieproef is voor de operatie 69%.

De operatie volgt op 29-5-'56 en wordt onder hypothermie uitgevoerd.

Veertien maanden na de operatie heeft de patiënt geen klachten meer. Het electrocardiogram wijst een duidelijke vermindering van de rechtshypertrophie uit. Er bestaat nu een incompleet rechter bundeltakblock. Het phonocardiogram toont een gering vroegdiastolisch geruis en een protodiastolisch geruisje. Het pulmonale deel van de tweede toon is niet meer verlaat.

Hartcatheterisatie is nog niet weer verricht.

Volgens deze gegevens is er door de operatie een ruim doorgankelijk pulmonaalostium verkregen.

Het lichamelijk prestatievermogen na de operatie is op grond van de resultaten van de functieproef 83%.

377. G.L.A.R., man van 24 jaar bij operatie.

Voor de operatie blijkt dat hij nooit met zijn leeftijdsgenoten heeft kunnen meedoen. Wegens progressieve dyspnée d'effort kan hij zwaardere lichamelijke inspanning niet meer verrichten, zijn werk als tekenaar is hem wel mogelijk.

In het electrocardiogram wordt het bestaan van een sterke rechtshypertrophie aangetoond. Op het phonocardiogram valt onder andere op het ruitvormig systolisch geruis met een laat maximum, dat het aorta-deel van de tweede toon

passeert. Het pulmonale deel van de tweede toon is klein en valt 0,11 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie: Bij drukmeting in de rechter ventrikel wordt 146/0 gevonden, in de arteria pulmonalis 19/7. De arteriële verzadiging wordt vastgesteld op 95%. De schatting van de grootte van het ostium pulmonale is 0,32 cm^2.

De diagnose luidt valvulaire pulmonaalstenose.

Het lichamelijk prestatievermogen bedraagt voor de operatie op grond van de resultaten van de functieproef 61%.

De operatie van 27-9-'55 wordt onder hypothermie verricht.

Twee jaar na de operatie heeft patiënt geen last van kortademigheid meer bij inspanning.

Het electrocardiogram toont een verbetering van de rechtshypertrophie, die evenwel nog duidelijk aanwezig is. Op het phonocardiogram is nog een vroeg systolisch geruis, dat decrescendo naar de tweede toon verloopt en hiervoor eindigt. Het pulmonale deel komt nog 0,04 seconden na het aorta-deel. Er is een gering protodiastolisch geruis.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel bedraagt nu 50/0 en in de arteria pulmonalis 22/5. Er is volledige arteriële zuurstofverzadiging. Het ostium wordt nu op 2,3 cm^2 geschat.

Uit deze gegevens blijkt een goed resultaat van de operatie al is er nog een geringe stenose blijkens het systolische drukverschil tussen de rechter ventrikel en de pulmonaalarterie.

Het lichamelijk prestatievermogen na de operatie bedraagt 70%.

518. M.O., scholier van 16 jaar tijdens de operatie.

Uit de anamnese voor de operatie blijkt een iets snellere vermoeibaarheid alleen bij zwaardere inspanning.

Er is een matige rechtshypertrophie volgens het electrocardiogram. Op het phonocardiogram is een ruitvormige systolische souffle te zien met een laat maximum, die de eerste component van de tweede toon passeert. Het kleine pulmonale deel komt op 0,09 seconden na het aortadeel.

Hartcatheterisatie: De rechter ventrikeldruk blijkt 105/0 en de arteria-pulmonalisdruk 22/4. De arteriële zuurstofverzadiging blijkt volledig. De schatting van de grootte van het pulmonaalostium bedraagt 0,66 cm^2.

De diagnose wordt gesteld op valvulaire pulmonaalstenose.

Het prestatievermogen wordt uit de functieproef op 72% geschat.

De operatiedatum is 28-8-'56. De operatie wordt verricht onder hypothermie.

Vijftien maanden postoperatief blijkt patiënt alles weer te kunnen doen. Het electrocardiogram vertoont nu nog slechts een incompleet rechter bundeltakblock. Het phonocardiogram heeft geen systolisch geruis meer, wel een injectietoon en een sterk protodiastolisch geruis.

Hartcatheterisatie na de operatie: In de rechter ventrikel heerst een druk van 30/0, in de arteria pulmonalis van 20/4. De arteriële verzadiging is 95%. Het ostium wordt geschat nu normaal wijd te zijn.

Behoudens de lichte pulmonaalinsufficientie is een normaal ostium verkregen.

Het lichamelijk prestatievermogen volgens de resultaten van de functieproef blijkt na de operatie 98%.

572. J.Th.J.M., ten tijde van de operatie 14 jaar, electricien.

Voor de operatie blijkt, dat alleen bij zwaardere inspanning vermoeidheid wat sneller optreedt dan bij leeftijdsgenoten. Het electrocardiogram toont sterke rechtshypertrophie. Op het phonocardiogram loopt een ruitvormige systolische souffle met een laat maximum door de eerste component van de tweede toon heen, het pulmonaal deel is erg klein en komt 0,13 seconden na het aorta-deel der tweede toon.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is 215/0 en in de arteria pulmonalis 19/2. De arteriële zuurstofverzadiging is volledig. Het ostium pulmonale wordt geschat op 0,5 cm^2.

Diagnose: valvulaire pulmonaalstenose.

Het lichamelijk prestatievermogen bedraagt op grond van de resultaten van de functieproef voor de operatie 76%.

Operatiedatum 19-9-'56. De operatie wordt onder hypothermie verricht.

Uit de anamnese 22 maanden na de operatie blijkt dat hij geen klachten meer heeft en zijn werk als electricien zonder bezwaar doet.

Op het electrocardiogram is de rechtshypertrophie duidelijk teruggegaan, er is nu een incompleet rechter bundeltakblock. Op het phonocardiogram bestaat een gering crescendo-decrescendo protosystolisch geruis, doch geen vertraging van het pulmonale deel van de tweede toon meer, maar wel een duidelijk protodiastolisch geruis.

Hartcatheterisatie is postoperatief niet verricht.

Op grond van deze gegevens mag een goed doorgankelijk pulmonaalostium na de operatie worden aangenomen.

Het prestatievermogen bedraagt na de operatie 91%.

632. Th.G.M.K., winkelbediende ten tijde van de operatie 27 jaar.

Hij is afgekeurd voor de militaire dienst. Sinds een jaar heeft hij hartkloppingen en is hij kortademig bij inspanning.

Het electrocardiogram vertoont duidelijk rechtshypertrophie. Op het phonocardiogram ziet men een ruitvormig systolisch geruis met een laat maximum doorlopend voorbij het eerste deel van de tweede toon. Het kleine pulmonale deel komt 0,10 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel bedraagt 70/0, in de arteria pulmonalis 20/5. De arteriële zuurstofverzadiging is volledig. Het ostium wordt geschat op ongeveer 1 cm^2.

Diagnose: Valvulaire pulmonaalstenose.

Het lichamelijk prestatievermogen wordt op grond van de resultaten van de functieproef op 74% geschat voor de operatie.

De operatie wordt onder hypothermie uitgevoerd op 4-2-'57.

Een jaar na de operatie zijn er geen dyspnoe en palpitaties meer bij inspanning en hij kan zijn werk goed verrichten.

Op het electrocardiogram is de rechtshypertrophie duidelijk teruggegaan, er is nu aanduiding van een incompleet rechter-bundeltakblock. Het phonocardiogram vertoont nu een holosystolisch geruis, dat decrescendo verloopt naar de tweede toon. Het pulmonale deel, dat nog iets kleiner is dan het aorta-deel van de tweede toon, komt 0,03 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie is na de operatie niet meer verricht.

Op grond van deze gegevens is een ruim doorgankelijk pulmonaalostium aannemelijk te achten.

Na de operatie is het lichamelijk prestatievermogen uit de resultaten van de functieproef bepaald 81%.

265. J.J.H., van beroep rubberbewerker, 26 jaar op het tijdstip van de operatie.

Sinds een jaar na een doorgemaakte icterus heeft hij lichte klachten van moeheid en kortademigheid bij inspanning.

Op het electrocardiogram is een duidelijke rechtshypertrophie aanwezig. Het phonocardiogram vertoont een systolisch crescendo-decrescendo geruis doorlopend door het aorta-deel van de tweede toon. Het kleine pulmonale deel valt 0,11 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel bedraagt 210/0 en in de arteria pulmonalis 15/5. De arteriële zuurstofverzadiging is volledig. De ostiumgrootte is naar schatting 0,35 cm^2.

Diagnose: Valvulaire pulmonaalstenose.

Het prestatievermogen is volgens de functieproef voor de operatie 56%.

Valvulotomie volgens Brock op 11-10-'54.

Zestien maanden na de operatie heeft patiënt geen klachten meer.

Op het electrocardiogram is de rechtshypertrophie sterk teruggegaan, nu is er een incompleet rechter bundeltakblock. Op het phonocardiogram is een gering crescendo-decrescendo protosystolisch geruis en een gering protodiastolisch geruisje te zien. Het pulmonale deel der tweede toon is niet verlaat.

Hartcatheterisatie postoperatief: De druk in de rechter ventrikel is in rust nu 50/0 en in de arteria pulmonalis 18/2. De arteriele zuurstofverzadiging is volledig. De ostiumgrootte wordt geschat op 2 cm^2.

Patiënt is sterk verbeterd, er is nog een lichte stenose aanwezig.

Het lichamelijk prestatievermogen bedraagt na de operatie volgens de resultaten van de functieproef 71%.

507. A.H.B., 18 jaar bij operatie.

Patiënt is iets sneller kortademig dan anderen.

Het electrocardiogram vertoont sterke rechtshypertrophie. Het phonocardiogram geeft een luid crescendo-decrescendo geruis met een laat maximum te zien, dat door het aorta-deel van de tweede toon heen loopt. Het zeer kleine pulmonaaldeel ligt 0,12 seconden na het aorta-deel van de tweede toon.

Hartcatheterisatie: De rechter ventrikeldruk is 210/0, de arteria pulmonalis druk 8/2. Er is volledige zuurstofverzadiging van het arteriële bloed. Het ostium wordt 0,28 cm^2 groot geschat.

Diagnose: Valvulaire pulmonaalstenose.

Het lichamelijk prestatievermogen geschat uit de functieproef bedraagt voor de operatie 57%.

Operatie op 4-5-'56 onder hypothermie.

Dertien maanden na de operatie zijn er geen klachten meer.

Op het electrocardiogram wordt een geringe vermindering van de rechtshypertrophie geconstateerd. Het phonocardiogram vertoont nog een luid ruitvormig protosystolisch geruis. Er is een duidelijk protodiastolisch geruis 0,03 seconden na het aorta-deel der tweede toon.

Hercatheterisatie is niet verricht.

Het phonocardiogram wijst op verbetering van de pulmonaalstenose.

Op grond van de resultaten van de functieproef bedraagt het lichamelijk prestatievermogen na de operatie 71%.

692. J.G.B.-v.d.B., huisvrouw tijdens de operatie 49 jaar oud.

Patiënte is sedert haar 28e jaar vlugger moe en kortademig dan normaal, deze klachten zijn progressief. Sinds oktober 1956 heeft zij veel last van bronchitis.

Het electrocardiogram toont een duidelijke rechtshypertrophie aan. Het phonocardiogram toont een ruitvormig systolisch geruis met een laat maximum doorlopend tot in het eerste deel van de tweede toon. Een pulmonaaldeel der tweede toon werd niet geregistreerd.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is 170/0. In de arteria pulmonalis 11/4. De arteriële zuurstofverzadiging bedraagt 93%. De ostiumgrootte wordt geschat op 0,7 cm^2.

Het longfunctieonderzoek: Vitale capaciteit 2540, dit is normaal 2730 ml. Tiffeneau exspiratoir 66%, inspiratoir 90%. Het maximaal ademminutenvolume is 75% van normaal.

De diagnose luidt valvulaire pulmonaalstenose met waarschijnlijk een open foramen ovale.

Het prestatievermogen is op grond van de resultaten van de functieproef voor de operatie 72%.

De operatiedatum is 16-4-'57. De operatie geschiedt onder hypothermie.

Veertien maanden na de operatie krijgt zij na een aanvankelijke verbetering weer veel klachten van kortademigheid, piepen op de borst en hoesten, nadat zij in begin 1958 een „griep" heeft doorgemaakt.

Het electrocardiogram is niet essentieel veranderd. Het phonocardiogram heeft een systolisch geruis decrescendo naar de tweede toon verlopend, er is nog slechts een geringe splijting van de tweede toon.

Hartcatheterisatie na de operatie: De druk in de rechter ventrikel is nu 60/0 en de druk in de arteria pulmonalis 40/10. De arteriële zuurstofverzadiging is nu 95%.

Longfunctieonderzoek: Vitale capaciteit 1860. Tiffeneau exspiratoir 64% en inspiratoir 92%. Het maximaal ademminutenvolume is nu 54% van normaal. Het functionele residu, dat nu werd bepaald blijkt 57% van de totale capaciteit te zijn, dit behoort 40% te zijn.

Over het geheel valt te zeggen, dat gezien de hartcatheterisatie, nog slechts een zeer geringe pulmonaalstenose bestaat. Haar klachten zijn voornamelijk toe te schrijven aan de chronische bronchitis. Dit is waarschijnlijk ook de reden, dat haar lichamelijk prestatievermogen, zoals dat geschat wordt uit de functieproef, na de operatie is afgenomen. Na de operatie blijkt het lichamelijk prestatievermogen uit de resultaten van de functieproef slechts 52%.

762. J.v.d.S.-B., huisvrouw van 28 jaar.

Patiënte is sedert haar jeugd wat sneller vermoeid dan anderen.

Het electrocardiogram vertoont geen rechtshypertrophie, er zijn wel aanwijzingen van een rechter bundeltakblock. Het phonocardiogram geeft een ruitvormige systolische souffle met een laat maximum, dat door het aorta-deel

van de tweede toon heen loopt, te zien. Het duidelijke pulmonale deel valt 0,09 seconden na het aorta-deel.

Hartcatheterisatie: De rechter ventrikel heeft een druk van 165/0, de arteria pulmonalis van 13/4. De arteriële verzadiging is volledig. Het geschatte ostium is 0,4 cm^2.

De diagnose luidt valvulaire pulmonaalstenose.

Het lichamelijk prestatievermogen op grond van de uitkomsten van de functieproef blijkt voor de operatie 64%.

De operatie vond plaats op 19-11-'57 onder hypothermie.

Een jaar na operatie is patiënte klachtenvrij.

Op het electrocardiogram zijn de tekenen van incompleet rechter bundeltakblock verdwenen. Het phonocardiogram toont een gering protosystolisch geruis, de tweede toon is niet meer gespleten, er is een gering protodiastolisch geruisje.

Hercatheterisatie is nog niet gedaan.

Uit deze gegevens blijkt een volledig gunstig resultaat van de operatie.

Na de operatie is het lichamelijk prestatievermogen gestegen tot 96%.

777. F.M., ambachtscholier van 15 jaar ten tijde van de operatie.

Patiënt is in de laatste tijd kortademig bij inspanning en heeft hierbij dan cyanose van lippen en vingers.

Het electrocardiogram wijst een duidelijke rechtshypertrophie uit.

Het phonocardiogram toont een duidelijk systolisch geruis met een laat maximum, dat doorloopt voorbij het eerste deel van de tweede toon. Het pulmonaal deel is niet te zien.

Hartcatheterisatie: De druk in de rechter ventrikel is 220/0, in de arteria pulmonalis 15/0. De arteriële zuurstofverzadiging bedraagt 83%. Het pulmonaalostium is naar schatting 0,19 cm^2.

De diagnose is valvulaire pulmonaalstenose met een open foramen ovale.

Het lichamelijk prestatievermogen op grond van de resultaten van de bij hem verrichte functieproef bedraagt slechts 28%.

De operatie vond plaats op 13-12-'57 onder hypothermie.

Negen maanden na operatie gaat het hem veel beter en hij kan nu alles doen zonder kortademigheid of cyanose. Hij kan het vakonderwijs op de ambachtsschool zonder bezwaar meedoen.

Het electrocardiogram wijst uit dat de rechtshypertrophie veel verminderd is. Het phonocardiogram geeft een protosystolisch geruis te zien en een zeer gering protodiastolisch geruisje.

De arteriële zuurstofverzadiging is nu 91%.

Hercatheterisatie werd nog niet verricht.

Uit deze gegevens blijkt dat de pulmonaalstenose sterk verminderd is.

Het prestatievermogen blijkt nu uit de resultaten van de functieproef 72%.

Voor een goede beoordeling van de operatieresultaten bij valvulotomie wegens pulmonaalstenose lijkt het wel zeer gewenst het aantal observaties uit te breiden. Uit dit kleine materiaal valt toch reeds te concluderen, dat bij de ongecompliceerde valvulaire pulmonaalstenose de kans dat de patiënt na de operatie weer over een normaal lichamelijk prestatievermogen zal kunnen beschikken, groot is.

TABEL D Observatie voor en na de operatie wegens:

Coarctatio aortae

Nummer	Tweede obs. aantal mnd. na operatie	V.P.I. Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %	Arb. 170 Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %	P.P.I. Pr. Verm. in %	Toe- of afname in %
539	24	86	—10	62	+15	79	— 5
587	11	93	—10	105	— 5	76	+23
380	12	87	—23	124	—47	81	—33
n=3		m=89%	—14 (75%)	97%	—12 (85%)	79%	— 5 (74%)

Tetralogie van Fallot

355	36	44%	+32 (76%)	57%	+43 (100%)	50%	+45 (95%)

Atrium septum defect

525	18	40	+41	42	+49	56	+27
704	6	65	+20	—		—	—
610	5	51	+19	54	+19	68	+41
520	6	119	—47	77	— 1	91	— 5
597	10	57	+12	78	+22	44	+34
n=5		m=66%	+ 9 (75%)	63%	+22 (85%)	65%	+27 (92%)

Pericarditis constrictiva

440	18	35%	+65 (100%)	37%	+39 (76%)	40%	+34 (74%)

Mitraalstenose gecombineerd met aorta insufficiëntie

845	26	71%	+21 (92%)	45%	+ 4 (49%)	61%	—13 (48%)

III. De patiënten met *coarctatio aortae* zijn over het algemeen weinig geïncapaciteerd. Een verbetering van het lichamelijk prestatievermogen door de operatie is dus niet te verwachten (tabel D, tabel E regel 11, 12 en 13).

IV. Ook voor de patiënten met een *open ductus Botalli* geldt, dat zij in het algemeen weinig geïncapaciteerd zijn, dit blijkt uit tabel E, regel 14.

V. Patiënten met *tetralogie van Fallot* zijn zeer sterk geïncapaciteerd zoals blijkt uit de groep van zes personen van tabel E regel 15 (zie ook tabel D).

TABEL E Groepen van patiënten, die slechts eenmaal werden geobserveerd

Regel	Diagnose	Aantal	V.P.I. Pr. Verm. in %	Arb. 170 Pr. Verm. in %	P.P.I. Pr. Verm. in %
1	Mitraalstenose	116	65	51	56
2	Geopereerde mitraalstenose	44	68	59	57
3	Mitraalstenose plus insuff.	31	62	47	48
4	Mitr.stenose plus aortavitia	38	64	50	50
5	Mitr.sten. plus andere vitia	9	75	58	64
6	Pulmonaalstenose	38	75	78	73
7	Geopereerde pulm.stenose	3	73	74	62
8	Pulm.sten. plus atr.sept.def.	10	68	73	71
9	Pulm.sten. plus ventr.s.def.	5	75	76	72
10	Pulmonaal insufficiëntie	2	91	55	57
11	Coarctatio aortae	43	90	80	80
12	Geopereerde coarct.aortae	3	83	92	78
13	Coarctatio aortae plus vitia	12	72	73	73
14	Open ductus Botalli	26	83	74	75
15	Fallot	6	50	56	60
16	Atrium septum defect	51	75	81	77
17	Geopereerd atr.sept.def.	2	92	95	73
18	A.S.D. plus andere vitia	11	66	64	62
19	Ventrikel septum defect	11	65	72	63
20	Aorta stenose	5	71	67	58
21	Aorta insufficiëntie	5	73	67	62
22	Aorta sten. plus insuff.	8	68	59	55
23	Pericarditis constrictiva	5	70	63	63
24	Eisenmenger	2	40	27	42

Volgens onze ervaring moet men patiënten met het syndroom van Fallot sneller toestaan de proef te beëindigen en zeker niet opdrijven, omdat zij in de herstelphase dikwijls neigen tot cyanose en arhythmieën. Zij hebben blijkbaar zelf de ervaring bij welke belasting deze bezwaren in de recovery zullen gaan optreden.

VI. en VII. Het *atrium septum defect* en *ventrikel septum defect* hebben een effect op het lichamelijk prestatievermogen dat door operatie grotendeels kan worden gecompenseerd (regel 16, 17, 18 en 19 en tabel D).

VIII. De *aorta vitia* (regel 20, 21 en 22) vormen dikwijls een contra-indicatie voor de fietsproef en zijn ons weinig toegestuurd. Deze patiënten hebben wel een in belangrijke mate verminderd prestatievermogen.

De mate van geïncapaciteerdheid bij patiënten met een combinatie van afwijkingen lijkt te worden bepaald door de som van de geïncapaciteerdheid van iedere afwijking afzonderlijk. De patiënt met zuivere mitraal-

stenose schijnt minder geïncapaciteerd dan de patiënt met hetzelfde oppervlak van het ostium, maar waar bovendien een insufficiëntie bestaat.

Bij de beoordeling van deze uitkomsten van de functieproef bij patiënten dient men zich vooral te realiseren, dat niet alle patiënten van de kliniek de functieproef verrichtten. Er zijn zelfs gehele groepen patiënten uitgesloten van deze fietsproef, omdat zij deze niet kunnen verrichten, zoals die onder de leeftijd van acht jaar, de patiënten met insufficientia cordis en andere zeer zieke patiënten.

Men dient voor ogen te houden, dat het door middel van de beschreven functieproef gemeten lichamelijk prestatievermogen van de gezonde mens afhankelijk is van zijn trainingstoestand. Deze speelt ook een rol bij de beoordeling van patiënten. Een patiënt met een congenitale afwijking, die van jongs af aan uitgesloten werd van gymnastiek en spel en die zichzelf voortdurend heeft ontzien, heeft alleen al uit hoofde van dien een gering lichamelijk prestatievermogen, zelfs indien de „congenitale afwijking" slechts een geruis aan het hart was zonder enige pathologische betekenis. Er is ook een verschil in lichamelijk prestatievermogen bij de patiënt, die dank zij een sterke wil, zij het met moeite, aan zijn werk is gebleven en de patiënt, die bij het geringste vermoeden van een hartaandoening zich als volledig invalide is gaan beschouwen. Dit brengt het waarderen van het lichamelijk prestatievermogen, ook op deze objectieve manier, terug tot een facet, die in combinatie met alle andere, ook psychische, verschijnselen bij de patiënt beoordeeld moet worden.

Bij de beoordeling van het lichamelijk prestatievermogen dient men die symptomen het zwaarst te laten wegen, die zich het eerst manifesteren tijdens het opvoeren van de belasting. Het optreden van ST-daling of veelvuldige extrasystolie tijdens de opklimmende belasting, die bij een bepaalde belasting gaat optreden, betekent dat deze belasting de grens voor het lichamelijk prestatievermogen van deze patiënt is.

Iemand, die een lichamelijk prestatievermogen heeft van minder dan 20%, is in de regel niet in staat zich buiten bed of ligstoel te handhaven; iemand met minder dan 50% kan slechts behoedzaam trappenlopen of fietsen. Beneden 80% van de normale waarden achten wij de betrokkene ongeschikt voor zwaar lichamelijk werk.

De beoordeling van een patiënt kan bemoeilijkt worden door psychische componenten. Over het algemeen doet deze moeilijkheid zich bij cardiologische patiënten niet voor. De patiënt is meestal positief ingesteld ten opzichte van de belastingsproef, hij zoekt genezing, hij past zich aan bij onplezierige bijkomstigheden als het ademen door een mondstuk en hij geeft zijn beste krachten aan het verrichten van de fietsproef. De simulerende of aggraverende patiënt probeert de indruk te maken slechts over een gering prestatievermogen te beschikken. Hij houdt de vereiste trapfrequentie niet of hij hyperventileert overbodig. De met opzet hyperventilerende patiënt vermindert zijn ademhaling na een aantal minuten onwillekeurig

om vervolgens opnieuw te hyperventileren. Meestal kan hij overtuigd worden, dat hij in een volgende proef niet bewust zijn ademhaling moet opvoeren. Indien de patiënt lopend is binnengekomen is het ondenkbaar, dat hij de onbelaste fietsergometer niet op gang zou kunnen houden. In deze gevallen dient men de patiënt te overtuigen van zijn eigen kunnen en hem de gelegenheid te geven de proef zo nodig te herhalen.

DISCUSSIE

In de voorgaande hoofdstukken werd ingegaan op de sociale betekenis van de kennis van het lichamelijk prestatievermogen, op de moeilijkheid tot een duidelijke omschrijving te geraken, op de mogelijkheden tot het bepalen van het prestatievermogen en op de betekenis der resultaten van de ontwikkelde methodiek. Het lijkt nuttig thans na te gaan welke ontwikkeling werd doorgemaakt en welke invloed het werk van anderen hierop had. Tenslotte zou men zich kunnen afvragen, of de beschreven functieproef bevredigend geacht kan worden.

Bij de ontwikkeling van deze functieproef werd uitgegaan van cardiologische patiënten. De eerste pogingen een verschil tussen hun prestatievermogen en dat van gezonden aan te tonen waren gebaseerd op de veronderstelling, dat de mechanische efficiency van beide groepen zou verschillen. Een dergelijk verschil bleek echter niet aantoonbaar.

Een vergelijking van het maximale hartminutenvolumen had het bezwaar patiënten maximaal te moeten belasten en was bovendien methodisch niet goed te verwezenlijken.

Het meten van de zuurstofschuld na het verrichten van een omschreven hoeveelheid arbeid en het vergelijken van deze zuurstofschuld met bij gezonden onder gelijke omstandigheden verkregen waarden had elders ingang gevonden (Nylin (1952), Jongbloed, Van Nieuwenhuizen en Van Goor (1949)). Uit eigen proeven om uit de grootte van de zuurstofschuld iets af te leiden omtrent het prestatievermogen van een individu bleek weliswaar een principiële bruikbaarheid, doch een beperkte nauwkeurigheid. Een voordeel echter was de mogelijkheid bij submaximale belasting waarnemingen te doen, die een zekere voorspellingskracht hadden ten aanzien van het lichamelijk prestatievermogen, dat gedefinieerd is als de maximale hoeveelheid arbeid per tijdseenheid, gedurende een zeker tijdsverloop te leveren.

Het lag voor de hand, dat een proef met submaximale belasting een beter inzicht zou geven, naarmate het gekozen belastingsniveau de maximale prestatie beter benaderde. Waar de „klinische blik" en de ziektegeschiedenis van de patiënt slechts gebrekkige middelen waren, werd gezocht naar een betere mogelijkheid de voor de proef geschikte belasting te kiezen. Deze werd gevonden in de door Müller (1950) beschreven „Leistungspulsindex". De bepaling van deze grootheid ging toen vooraf aan de stofwisselingsproef met constante belasting. Hiermee werd een tweetal nieuwe aspecten, die voor de verdere ontwikkeling van belang

zouden blijken, ingevoerd: het gebruik van de polsfrequentie als indicator voor het lichamelijk prestatievermogen en het toepassen van een toenemende belasting bij de ergometerproef.

Müller had aangetoond, dat een vermindering in het lichamelijk prestatievermogen veelal gepaard gaat aan een verhoging van de polsfrequentie tijdens arbeid. Wanneer hij de arbeidsbelasting en daarmee de zuurstofopname voor een proefpersoon lineair deed toenemen, dan bleek ook de polsfrequentie lineair te stijgen. De mate, waarin de polsfrequentie steeg bij een bepaalde en steeds gelijke stijging van de arbeidsbelasting bleek af te hangen van de grootte van het lichamelijk prestatievermogen van de proefpersoon. Sjöstrand (1941, 1947) had reeds de aandacht op de betekenis van de polsfrequentie gevestigd. Hij bepaalde het arbeidsvermogen, dat geleverd kon worden bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut, Müller daarentegen de polsfrequentie bij een aantal niveau's van arbeidsbelasting. Uit onze eigen proeven bleek niet alleen een goede overeenstemming tussen de beide vormen van meting van het lichamelijk prestatievermogen, maar ook een goede correlatie met andere criteria.

De door Müller toegepaste continu oplopende arbeidsbelasting stond ook niet geheel alleen. Wahlund immers verhoogde de belasting van zijn fietsergometer trapsgewijze met ongeveer 50 watt na verloop van telkens 6½ minuut. Ook hij mat hierbij de polsfrequentie en gebruikte onder meer het criterium van Sjöstrand: het bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut te leveren arbeidsvermogen.

Zoals gezegd, was de bepaling van de zogenaamde „Leistungspulsindex" aanvankelijk slechts bedoeld als een verkenning van het lichamelijk prestatievermogen ten behoeve van een juiste keuze van het belastingsniveau voor de eigenlijke functieproef. De door Müller ontworpen fietsergometer was ten behoeve van de patiënten in dier voege gewijzigd, dat niet alleen een toename van 10, maar ook van 5 watt per minuut mogelijk werd. Als systeem werd aanvaard, dat de functieproef bestond uit 10 minuten fietsen bij een belasting van $^2/_3$ van het vermogen, waarbij in de voorproef met oplopende belasting een polsfrequentie van 170 slagen per minuut bereikt werd.

Toen het gebruik van oplopende belasting goed bleek te voldoen, werd bij wijze van proef de zuurstofopname gemeten met een continu registrerende methode (diaferometer volgens Noyons). Hierbij bleek niet alleen een fraai lineaire stijging van de zuurstofopname, maar ook, dat bij overgang van oplopende naar constante belasting de zuurstofopname binnen één minuut constant werd. Met andere woorden de zuurstofopname tijdens iedere minuut van de proef kwam overeen met het verbruik per minuut tijdens langdurige arbeid op het overeenkomstig niveau. Hieruit volgde, dat ook de zuurstofschuld, in te lossen na het staken van de aldus oplopende belasting, gelijk moest zijn aan die, welke bestaat na langer durende arbeid met een intensiteit gelijk aan de hoogst bereikte. Hiermee

verviel de noodzaak voor een dubbele proef. De stofwisseling wordt sedertdien gemeten tijdens oplopende belasting en in de herstelperiode. De polsprestatie-index, het arbeidsvermogen bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut en de zuurstofschuld worden uit één proef berekend.

Met het voorbeeld van WAHLUND voor ogen werd ook aandacht gegeven aan de ademhaling. Het meten van de ventilatie en het bepalen van de ademfrequentie werden mogelijk gemaakt door het bouwen van een flowmeter volgens LILLY en bijbehorende electronische apparatuur. Het bestuderen van de ventilatie bij continu oplopende belasting leidde tot de conceptie van de ventilatie-prestatie-index. Hiermee werd niet alleen bereikt, dat de ventilatie bij cardiologische patiënten meer aandacht kreeg, maar ook, dat de functieproef betekenis kreeg voor patiënten met afwijkingen van de tractus respiratorius.

In verschillende centra zijn pogingen ondernomen het lichamelijk prestatievermogen bij bepaalde ziektetoestanden af te leiden uit de arbeidsbelasting, waarbij zich een onderverzadiging van het arteriële bloed openbaart. Het meten van de verzadiging van arterieel bloed tijdens arbeid is bij ons onderzoek nooit een standaardmethode geworden. De onbloedige oxymetrie tijdens arbeid bleek voorlopig nog in meer dan een opzicht onbetrouwbaar, respectievelijk de arteriepunctie in het algemeen te bezwaarlijk. Wèl bleek het goed mogelijk eind-exspiratielucht tijdens arbeid op te vangen en te analyseren. Kennis van de alveolaire partiële zuurstofspanning of een benadering hiervan door middel van „end tidal air" en van de gemiddelde zuurstofspanning in de longcapillairen zou kunnen leiden tot een berekening van de diffusiecapaciteit, dit is de hoeveelheid zuurstof, die per minuut per mm Hg verschil in zuurstofspanning aan weerszijden van de longmembraan, diffundeert:

$$D_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{P_A - P_{\bar{C}}}$$

Voor de beoordeling van het lichamelijk prestatievermogen zou het van belang zijn de maximale diffusiecapaciteit — dus tijdens maximale belasting — te kunnen meten, maar de gemiddelde zuurstofspanning in de longcapillairen $P_{\bar{C}}$ is slechts moeizaam te berekenen uit het verschil in zuurstofspanning van bloed, dat de longcapillairen binnenkomt en dat dit gebied verlaat. Een benaderende grafische methode bood hulp, maar liet de noodzaak bestaan het zuurstofgehalte van gemengd veneus bloed te kennen. Deze tijdens de inspanningsproef direct te meten met behulp van een catheter in de arteria pulmonalis werd niet verantwoord geacht. Een benaderende berekening uit de polsfrequentie en de zogenaamde basale waarde van het zuurstofgehalte van gemengd veneus bloed mag toelaatbaar zijn voor gezonde proefpersonen, de waarde voor patiënten blijft voorshands twijfelachtig. Het schatten van de diffusiecapaciteit tijdens inspan-

ning heeft bij de huidige stand van zaken derhalve nog geen praktische betekenis.

Het opnemen van het electrocardiogram en het op regelmatige tijden beoordelen ervan tijdens de proef is van wezenlijk belang gebleken als indicator voor het optreden van stoornissen in de zuurstofvoorziening van de hartspier bij toenemende belasting en dus als voorbehoedmiddel tegen gevaarlijke overbelasting van de patiënt. Wanneer bepaalde afwijkingen in het electrocardiogram bij een zekere belasting optreden zonder dat uit andere criteria een beperking van het lichamelijk prestatievermogen blijkt, kan men de aan de patiënt op te leggen beperkingen beter objectiveren.

Beziet men nu de functieproef, zoals deze thans wordt uitgevoerd tegen de achtergrond van wat anderen hebben beschreven, dan blijken alle in aanmerking komende aspecten te zijn getoetst door eigen onderzoek. Voor zover mogelijk en wenselijk, werden deze gecombineerd in een voor onderzoeker en onderzochte goed uitvoerbare proef.

Ten aanzien van het criterium voor het lichamelijk prestatievermogen van SJÖSTRAND: de totale hoeveelheid haemoglobine, zij nog opgemerkt, dat deze grootheid slechts betekenis heeft als zij de beperkende factor is, dus als de ademhaling en de bloedsomloop geheel intact zijn. Bij onze vraagstelling is het haemoglobinegehalte normaal verondersteld en het onderzoek primair gericht op de functie van tractus respiratorius en circulatorius.

Reeds in de inleiding werd gewezen op de betekenis van de functie van een aantal achter elkaar geschakelde processen: ventilatie, diffusie, zuurstofbinding in het bloed en circulatie. Er werd toen gesteld dat het lichamelijk prestatievermogen afhankelijk is van de capaciteit van het zuurstoftransport en bepaald wordt door de mate, waarin beperkingen aanwezig zijn in de genoemde processen. Wanneer de voorstelling juist is dat men hier te maken heeft met een keten, waarvan de sterkte wordt bepaald door de zwakste schakel, dan zou men tot een verkeerd oordeel komen bij de bepaling van het lichamelijk prestatievermogen, indien men niet de zwakste schakel in het onderzoek zou betrekken. Om verkeerde interpretaties te voorkomen zou men of wel de sterkte van iedere schakel afzonderlijk of wel de sterkte van de gehele keten moeten bepalen. Het laatste wordt in feite gedaan door de Zweedse onderzoekers, die de zuurstofopname bij maximale inspanning meten. Er is echter reeds herhaalde malen gewezen op de ontoelaatbaarheid van proeven met maximale inspanning bij patiënten. Bezien wij thans de mogelijkheid om de sterkte van alle schakels afzonderlijk te bepalen dan moeten wij vaststellen, dat dit bij de huidige onderzoektechniek onvoldoende mogelijk is.

Wel weten wij dat de hoeveelheid zuurstof, die per tijdseenheid passeert in iedere schakel, gelijk moet zijn indien er een steady state bestaat en indien de maximale capaciteit van de zwakste schakel nog niet bereikt is. Bovendien weten wij dat de hoeveelheid zuurstof, die bij een zekere

arbeidsbelasting door patiënten per tijdseenheid wordt opgenomen, niet noemenswaardig verschilt van de zuurstofopname van gezonde proefpersonen. Immers de mechanische efficiëntie is voor beide groepen gelijk te stellen. De hoeveelheid zuurstof, die per tijdseenheid de verschillende schakels passeert, is dus te voorspellen uit de arbeidsbelasting. Het is dan ook niet de zuurstofoverdracht door iedere schakel, maar het gedrag binnen de schakel, dat ons iets kan leren over zijn sterkte.

Dit is bijvoorbeeld het geval bij de ventilatie. De zuurstofopname $\dot{V}_{O_2} = \dot{V}(F_I—F_E)$ [1]). In vele gevallen van verminderd prestatievermogen blijkt bij eenzelfde waarde van $\dot{V}_{O_2}$ de ventilatie abnormaal hoog te zijn. Wordt de arbeidsbelasting en daarmede de waarde van $\dot{V}_{O_2}$ steeds meer verhoogd, dan reageert een dergelijke patiënt met een abnormaal sterke toename van de ventilatie. Hierdoor bereikt de ventilatie zijn maximum ongewoon snel en is bij steeds gelijke — kennelijk begrensde — waarde van $F_I—F_E$ de maximale waarde van het product $\dot{V}(F_I—F_E)$ lager dan bij gezonde proefpersonen.

Eveneens bleek in vele gevallen de polsfrequentie hoger te zijn dan bij gezonde proefpersonen met een overeenkomstige arbeidsbelasting het geval is. Hier is de overdracht van zuurstof door de circulatie weer gelijk aan de zuurstofopname, hetgeen te schrijven is als $\dot{V}_{O_2} = Pf \times S \times (C_a—C_{\bar{v}})$. Verhoging van de arbeidsbelasting heeft een toename van $\dot{V}_{O_2}$ ten gevolge, gepaard aan een abnormale stijging van Pf. De maximale waarde van de zuurstofoverdracht door de circulatie en daarmede de sterkte van deze schakel wordt beperkt door het abnormaal vroeg bereiken van de maximale waarde van de polsfrequentie. Aan de hand van deze beide voorbeelden is aannemelijk gemaakt, dat het gedrag van een der factoren in het product, dat de waarde van een bepaalde schakel bepaalt, bij submaximale belasting een voorspelling kan inhouden ten aanzien van de maximale waarde van het product en dus van de sterkte van de schakel. In feite berusten het bepalen van het lichamelijk prestatievermogen bij submaximale belasting uit de ventilatie door WAHLUND (1948) en een overeenkomstige bepaling uit de polsfrequentie door SJÖSTRAND (1947), MÜLLER (1950) en ÅSTRAND (1954) op deze zelfde grondslag.

Hoe de beide als voorbeeld gekozen schakels in de gehele keten van het zuurstoftransport van buitenlucht naar weefsels zijn opgenomen kan worden toegelicht aan de volgende formule:

zuurstofopname $\dot{V}_{O_2} = \dot{V}(F_I—F_E) = \dot{V}_A(F_I—F_A) = D_{O_2}(P_A—P_{\bar{c}}) = \dot{Q}_c(C_{c'}—C_{\bar{v}}) = Pf \times S \times (C_a—C_{\bar{v}}) = \dot{V}_{O_2}$ zuurstofverbruik.

In deze formule is $\dot{V}$ de ventilatie, $\dot{V}_A$ de alveolaire ventilatie, D_{O_2} de diffusiecapaciteit, $\dot{Q}_c$ de circulatie door de longcapillairen, Pf de polsfrequentie en S het slagvolume.

Van de eerste schakel $\dot{V}(F_I—F_E)$ worden beide factoren gemeten. Van

[1]) Zie de lijst van symbolen op de laatste pagina.

de tweede schakel $\dot{v}_A$ (F_I—F_A) is F_I bekend en wordt F_A benaderd uit de end tidal air. $\dot{v}_A$ is hieruit te berekenen. In de derde schakel D_{O_2} (P_A—$P_{\bar{c}}$) wordt P_A geschat uit F_A, en $P_{\bar{c}}$ benaderd door de in appendix III beschreven grafische methode. De berekening van D_{O_2} is a fortiori een benadering. In de term $\dot{Q}_c$ ($C_{c'}$—$C_{\bar{v}}$) is $C_{c'}$ uit P_A af te leiden en $C_{\bar{v}}$ althans bij normale proefpersonen af te leiden uit de polsfrequentie (zie hoofdstuk IV B). $\dot{Q}_c$ is hieruit te schatten. De term $Pf \times s \times (C_a—C_{\bar{v}})$ is aan dezelfde beperking onderhevig als de vorige ten aanzien van $C_{\bar{v}}$. C_a is afgeleid uit $C_{c'}$ en derhalve nog meer een benadering dan de laatste. Het slagvolume s is onbekend. Alleen de polsfrequentie Pf is direct meetbaar.

Bezien wij thans de in formule gebrachte keten van functies in zijn geheel dan zij nogmaals vastgesteld, dat de waarde van ieder der schakels in de steady state steeds gelijk is aan die der andere. Een begrenzing van het lichamelijk prestatievermogen wordt veroorzaakt doordat de waarde van een der schakels zijn maximum bereikt. De zuurstofopname kan dan niet hoger worden opgevoerd, doch ook tijdens het maximale zuurstoftransport behouden alle schakels dezelfde waarde.

Het ligt voor de hand een verklaring te zoeken voor de door ons en andere onderzoekers waargenomen verschijnselen. Ten aanzien van de ventilatie kan gezegd worden, dat bij gelijkblijvend product een hoge waarde van $\dot{v}$ moet samengaan met een lage waarde van F_I—F_E; aangezien F_I door de buitenlucht wordt bepaald en als constant mag worden beschouwd heeft F_E een hogere waarde. Wij beschikken helaas nog niet over voldoende gegevens om de ventilatie gemeten tijdens arbeid te kunnen vergelijken met de uitkomsten van een uitvoerig longfunctie-onderzoek. Hieruit zou wellicht kunnen blijken, dat een hoge waarde van F_E zowel door een vergroting van de dode ruimte of een ongelijkmatige ventilatie kan worden veroorzaakt als door een bemoeilijkte diffusie door de longmembraan.

Ten aanzien van de term $Pf \times s \times (C_a—C_{\bar{v}})$ doet zich het analoge feit voor dat de grootte van de polsfrequentie een goede graadmeter blijkt te zijn voor het lichamelijk prestatievermogen. Kennelijk is de waarde van het product $s \times (C_a—C_{\bar{v}})$ kleiner geworden bij vele vormen van verminderd lichamelijk prestatievermogen, doch welke der beide factoren de meeste invloed heeft, is niet uit te maken zonder volledige kennis van het hartminutenvolume, respectievelijk van het arterioveneuze verschil in zuurstofgehalte tijdens arbeid. Een klein werkelijk of effectief slagvolume bij bijvoorbeeld mitraalstenose, respectievelijk mitraalinsufficiëntie, lijkt intussen aannemelijker dan een geringere utilisatie van het bloed.

Er bestaat dus nog grote behoefte aan een methodiek voor het meten van de diffusiecapaciteit en van de gemengd veneuse saturatie tijdens arbeid. Hiermee zou niet alleen het belang van de diagnosticus, doch ook dat van de thoraxchirurg gediend zijn, omdat de functionele betekenis van verschillende ziektetoestanden beter begrepen zou kunnen worden.

Wil men de betekenis toetsen der waardevol geachte criteria, dan ondervindt men de moeilijkheid niet over andere graadmeters te beschikken. De beste wijze van evaluatie ligt in principe in een vergelijking van de uitkomsten van de functieproef met de in het dagelijks leven mogelijk gebleken activiteiten van de patiënt. Het is echter zeer moeilijk deze in een getal uit te drukken. Een goede onderlinge correlatie zegt wellicht iets, doch geeft geen bewijs en goede correlaties met klinische observaties (Van Deth (1956)), waaronder de resultaten van hartcatheterisatie zijn suggestief, maar evenmin doorslaggevend. De beste mogelijkheden tot beoordeling liggen vermoedelijk in de resultaten van de functieproef bij die patiënten, die voor en na operatie werden onderzocht, althans wanneer bij die operatie de afwijking, die als oorzaak van het verminderd prestatievermogen beschouwd werd, goed kon worden waargenomen en verholpen.

Bepaling van het lichamelijk prestatievermogen bleek van belang o.a. bij mitraalstenose en pulmonaalstenose evenals bij andere toestanden, die buiten het bestek van deze verhandeling vallen, zoals chronische bronchitis, emphyseem, genezen al dan niet chirurgisch behandelde vormen van tuberculose, klachten over algemene vermoeidheid of angst voor de gevolgen van te zware inspanning. Ook bleek objectieve meting van de trainingstoestand van sportbeoefenaren goed mogelijk te zijn.

Enigszins anders is het gesteld bij patiënten met een hypertensie of coronair-sclerose. Hier is de inspanningsproef bruikbaar, doch het accent valt op de bloeddrukmeting, respectievelijk het electrocardiogram.

Bovendien zijn er nog vele afwijkingen op verschillend gebied, die tot verminderde validiteit, doch niet tot een verminderd lichamelijk prestatievermogen volgens onze definitie leiden.

SAMENVATTING

De mogelijkheid tot operatieve behandeling van patiënten, die door hun verminderd lichamelijk prestatievermogen geen adaequate plaats in de maatschappij kunnen innemen, neemt in de laatste jaren toe. Het op objectieve wijze beoordelen van het lichamelijk prestatievermogen is van toenemend belang voor de indicatiestelling van zulke operaties en voor de plaatsing van de geopereerde patiënten.

Ook voor de bedrijfsgeneeskundige is het beoordelen van het lichamelijk prestatievermogen belangrijk.

Soms zijn objectieve verschijnselen in rust al voldoende om de validiteit vast te stellen, maar in vele gevallen is een bepaling van het lichamelijk prestatievermogen door middel van een functieproef pas doorslaggevend.

Müller bepaalt het lichamelijk prestatievermogen door het meten van de polsfrequentie bij arbeid op een hiervoor ontworpen fietsergometer.

Åstrand heeft het verschil in lichamelijk prestatievermogen, dat tussen beide geslachten en op verschillende leeftijd bestaat, vastgesteld door het meten van de maximale zuurstofopname. Hij toont in navolging van Sjöstrand, dat er een verband is tussen het vermogen tot zuurstofopname en de totale hoeveelheid haemoglobine van het lichaam.

Methoden voor de kliniek hebben vooral Nylin en Wahlund in Zweden en Jongbloed, Van Nieuwenhuizen en Van Goor in ons land beschreven. Burger heeft een test ten behoeve van de bedrijfsgeneeskunde ontwikkeld.

Mede met deze literatuurgegevens als leidraad is een onderzoek naar een methode ter bepaling van het lichamelijk prestatievermogen ingesteld. Hierbij heeft de gedachte vooropgestaan, dat maximale inspanning bij cardiologische patiënten vermeden dient te worden. Dit dwingt tot een zo nauwkeurig mogelijke bepaling van het lichamelijk prestatievermogen uit submaximale waarden.

Het lichamelijk prestatievermogen kan worden uitgedrukt in de verhouding tussen het vermogen, waarover iemand beschikt en dat waarover hij volgens zijn geslacht, leeftijd en lichaamsbouw zou moeten beschikken. Het lichamelijk prestatievermogen van een bepaalde mens is dan in een percentage van de voor hem normale waarde weer te geven. Binnen nauwe grenzen zijn de arbeidsbelasting en zuurstofopname aan elkaar gekoppeld. Het vermogen tot zuurstoftransport van lucht naar spieren bepaalt dus het prestatievermogen. De getrainde sportman heeft een grotere capaciteit voor dit zuurstoftransport, de geïncapaciteerde een kleinere dan de gemiddelde gezonde mens. Het vermogen tot zuurstoftransport wordt be-

paald door ventilatie, diffusie en circulatie, terwijl de grootte van de zuurstofschuld een afspiegeling van dit vermogen is.

Tijdens de functieproef blijken het ademminutenvolume en de polsfrequentie goed meetbare grootheden te zijn, evenals de zuurstofschuld na het beëindigen van de inspanningsproef.

De toename van het ademminutenvolume, de arbeidsbelasting bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut en de polsfrequentietoename bij een bepaalde toename van de belasting worden gebruikt om het lichamelijk prestatievermogen van cardiologische patiënten te vergelijken met normen verkregen uit proeven met gezonde proefpersonen, die niet uitzonderlijk getraind zijn en in geslacht, leeftijd en gewicht met de onderzochte overeenkomen. Het lichamelijk prestatievermogen van de patiënt kan hierdoor worden weergegeven als een percentage van de normale waarde voor ieder der genoemde criteria.

Enkele beschouwingen over ergometrie kunnen bij een bespreking van functieproeven niet ontbreken.

De vorm en de intensiteit van de arbeidsbelasting dient zodanig gekozen te worden, dat enige groepen grote spieren worden ingeschakeld. Alleen dan is een voldoende stijging van de zuurstofopname te verkrijgen. Dit is het geval bij de fietsergometer, de zwengelergometer en de tredmolen.

Zoals reeds gezegd dient men de patiënt te onderzoeken bij submaximale belasting. De toepassing van een oplopende belasting heeft hierbij belangrijke voordelen. Het instellen van de belasting vóór een bepaalde proef stuit immers op de moeilijkheid, dat men de maximale belasting nog niet kent.

Sommige onderzoekers laten om deze reden een aantal proeven achtereenvolgens verrichten, waarbij zij telkens een hoger belastingsniveau kiezen. Deze gang van zaken leidt tot een ongewenste vermoeidheid van de proefpersoon of wel tot het verrichten van onderzoekingen in verschillende zittingen. De beschreven methode van oplopende belasting komt aan deze bezwaren tegemoet, doordat bij een juiste keuze van de belastingstoename de proef niet langer behoeft te duren dan ongeveer 12 tot 15 minuten. De proefpersoon doorloopt als het ware een reeks van geleidelijk in elkaar overgaande toestanden van zogenaamde steady state. Aangetoond is dat na een toename van de belasting, overeenkomend met een toename van de zuurstofopname van niet meer dan 150 ml per minuut, bij overgaan tot een constante belasting reeds in de volgende minuut een steady state optreedt; met andere woorden de zuurstofopname stelt zich binnen een minuut in op een constant niveau. Voor de fietsergometer betekent dit, dat de toename niet groter mag zijn dan 10 watt per minuut, voor de zwengelergometer niet groter dan 5 watt per minuut en voor de tredmolen, bij een snelheid van de band van 1 m/sec., een toename van de hellingshoek niet groter dan een halve graad per minuut.

Pogingen om de validiteit te bepalen uit het efficiëntieverschil tussen patiënten en normalen, die op theoretische grond overweging verdienen, blijken in de practijk weinig op te leveren ten gevolge van de grootte van de spreiding, die optreedt bij het meten van de zuurstofopname. De efficiëntie van het fietsen bij cardiologische patiënten verschilt niet aantoonbaar van die bij gezonde proefpersonen. Bij beide groepen vindt men 22 s 2,2 %.

De proefopstelling is derhalve meer gericht op de meting of berekening van de processen, die een rol spelen bij de overdracht van zuurstof uit de lucht naar de spieren. Van de ademhaling worden gemeten het ademminutenvolume en het zuurstof- en koolzuurfractieverschil tussen buitenlucht en gemengde exspiratielucht. Van de circulatie wordt de polsfrequentie continu gemeten, terwijl bloeddruk en electrocardiogram iedere minuut worden opgenomen.

Als criteria ter bepaling van het lichamelijk prestatievermogen worden gebruikt:

1. de *ventilatie-prestatie-index,* d.w.z. de toename van het ademminutenvolume per toename van de belasting met 10 watt (fig. 5). De normale toename van het ademminutenvolume bedraagt 2,2 liter per 10 watt toename van de belasting. Deze normale waarde is onafhankelijk van geslacht, leeftijd of gewicht van de onderzochte. De coëfficiënt van variatie van de ventilatie-prestatie-index blijkt bij proefpersonen 12,6%.
2. de *arbeidsbelasting,* waarbij een polsfrequentie van *170 slagen per minuut* optreedt, blijkt redelijk te correleren met het lichaamsgewicht, zodat de normale waarden opgegeven kunnen worden per kg lichaamsgewicht. Voor de volwassen man geldt dat 3,04 watt en voor de volwassen vrouw, dat 2,33 watt per kg lichaamsgewicht bij een polsfrequentie van 170 slagen per minuut geleverd kan worden. De coëfficiënt van variatie voor de arbeidsprestatie, die geleverd kan worden bij polsfrequentie 170, is 9,5% bij normale proefpersonen.
3. de *pols-prestatie-index* is de toename van de polsfrequentie per 10 watt toename van de belasting (fig. 5). De normale waarde bedraagt voor de volwassen man 4,0; voor de volwassen vrouw 5,7. De waarden voor de verschillende leeftijden tussen 8 en 60 jaar worden in tabel 3 gegeven. De coëfficiënt van variatie voor de pols-prestatie-index is bij normale proefpersonen 8,6%.
4. de *zuurstofschuld* blijkt in een bepaalde relatie te staan met de netto zuurstofopname en daarmee met de belasting. Voor de bepaling van het lichamelijk prestatievermogen worden de uit dit verband te verwachten en de werkelijk gevonden zuurstofschuld met elkaar vergeleken.

De spreiding van de zuurstofschuld bij proefpersonen, die de functieproef achtmaal herhaalden, is ongeveer 27% (zie Appendix I). Dit maakt dit criterium voor de bepaling van het lichamelijk prestatievermogen minder geschikt dan de andere gebruikte criteria.

5. de *electrocardiografische veranderingen* (ST-daling, multiple extrasystolen) tijdens de belastingsproef, die vooral bij mitraalstenose optreden, kunnen wijzen op een onvoldoende oxygenatie van de hartspier tijdens inspanning.
   Het beoordelen van een direct geschreven electrocardiogram tijdens de belastingsproef geeft niet alleen een inzicht in de toelaatbare arbeidsbelasting, doch is ook onmisbaar als beveiligingsmaatregel tegen overbelasting van de patiënt.

Ten einde de betekenis van de aldus bewerkte waarnemingsuitkomsten voor de schatting van het lichamelijk prestatievermogen te bepalen, werd nagegaan in hoeverre er een correlatie bestond tussen deze grootheden onderling, respectievelijk tussen de gegevens van de functieproef en van de hartcatheterisatie in rust. Met behulp van laatstgenoemde gegevens werd gepoogd ook een indruk van de diffusiecapaciteit van de longmembraan voor zuurstof te verkrijgen.

De correlatie tussen de ventilatie-prestatie-index en de logarithme van de perifere longvaatweerstand bij patiënten met mitraalstenose bedroeg bij 12 mannen —0,90 en bij 16 vrouwen —0,93 (zie figuur 11 en 12). De logarithme van de longvaatweerstand correleerde met de geschatte diffusiecapaciteit van de longen met een coëfficiënt van —0,777 ($n = 77$) (zie figuur 13). Uit dezelfde gegevens bleek een correlatie tussen de diffusie in ml zuurstof per minuut per mm Hg en de ventilatie-prestatie-index van 0,71 ($n = 47$) (zie figuur 14). Een verband van de grootte van het ostium mitrale berekend uit de catheterisatiegegevens van patiënten lijdende aan mitraalstenose met de pols-prestatie-index kwam tot uiting in de rangorde correlatie volgens Spearman van 0,695 ($n = 49$) (zie figuur 15). De rangorde correlatie tussen het ostium pulmonale en de pols-prestatie-index bij pulmonaalstenose van het valvulaire type bedraagt 0,896 ($n = 11$) (zie figuur 16).

De gevonden correlaties lijken het gebruik van de uitkomsten van de functieproef voor het schatten en vervolgen van het lichamelijk prestatievermogen van hartpatiënten te rechtvaardigen.

Bovendien bleek bij berekening van de cardiac output tijdens inspanning volgens een benaderende methode bij patiënten met ernstige mitraalstenose een lagere waarde gevonden te worden dan bij gezonden. In een geval van geslaagde commissurotomie bleek het hartminutenvolume te zijn gestegen ten opzichte van de waarden voor operatie en normale waarden te hebben bereikt (figuur 17).

Bij patiënten met pulmonaalstenose werden de klinische bevindingen

vermeld tezamen met de resultaten van de functieproef. Hoewel dit materiaal moeilijk mathematisch is te bewerken, omdat de klinische bevindingen niet alle in maat en getal zijn uit te drukken, lijkt ook hier een goede overeenstemming te bestaan.

Gebruikt men de uitkomsten van de functieproef voor de beoordeling van patiënten, dan komt men tot de volgende gevolgtrekkingen. De toename van het lichamelijk prestatievermogen bij door ons onderzochte patiënten met mitraalstenose na de commissurotomie bedroeg ongeveer twintig procent. Voor de operatie was het lichamelijk prestatievermogen van de onderzochte groep van 57 patiënten gemiddeld ongeveer 46%, na de operatie 66% (tabel A en B). Ondanks de belangrijke verbetering door de operatie moesten zij meestal ongeschikt worden geacht voor zwaar lichamelijk werk. Subjectief zijn zij sterk verbeterd als gevolg van de verminderde dyspnée d'effort. Bij de functieproef vindt men dienovereenkomstig een kleiner ademminutenvolume bij een bepaalde arbeidsbelasting, dan voor de operatie het geval was.

Voor de patiënten met pulmonaalstenose waren de gemiddelde waarden van het lichamelijk prestatievermogen vóór operatie 63%. In ongecompliceerde gevallen van valvulaire pulmonaalstenose werden na de operatie weer normale waarden bereikt (tabel C betreffende 14 patiënten). Patiënten met coarctatio aortae of open ductus Botalli bleken over het algemeen weinig geïncapaciteerd te zijn. Wel geïncapaciteerd waren de meeste patiënten met een atrium- of ventrikelseptumdefect, die ter onderzoek kwamen (tabel D en E). Het lichamelijk prestatievermogen van de onderzochte patiënten met een tetralogie van Fallot was zeer sterk verminderd. Ook de aorta vitia veroorzaakten een verminderd lichamelijk prestatievermogen (tabel D en E).

Bij het bezien van deze resultaten dient men zich te realiseren, dat niet alle patiënten door ons onderzocht werden. De al te zieke patiënten konden deze functieproef niet ondergaan. De patiënten, die zich na de operatie weer geheel goed gevoelden, kwamen niet allen terug voor het controleonderzoek.

De beschreven meting van het lichamelijk prestatievermogen blijkt een individuele beoordeling van patiënten mogelijk te maken, die belangrijk kan zijn voor de kliniek, vooral in die gevallen waar de indicatie voor operatie op klinische en haemodynamische gronden dubieus is. De bepaling is voorts geschikt om het resultaat van de ingreep vast te stellen. Zowel na operatie als bij chronische ziektetoestanden of vermoeden daarop biedt de functieproef mogelijkheden tot het geven van adviezen voor een juiste plaatsing van de onderzochte in de maatschappij.

SUMMARY

A. *Introduction*

An increasing number of patients who are too disabled to lead a normal life can now be operated upon. In order to assess the value of such an operation and to be able to place them in suitable occupations afterwards, it is becoming more and more important to assess objectively their physical working capacity. This is also of great interest to medical officers in industry. Observations made at rest are sometimes adequate for this assessment, but in many cases the working capacity can only be determined from a function test.

B. *Literature*

MÜLLER has estimated physical working capacities by measuring pulse frequencies during work on a bicycle ergometer, which was specially developed for the purpose.

ÅSTRAND has established age and sex differences in working capacities by measuring the maximum oxygen uptake. Clearly this is more appropriate for healthy young persons. Following SJÖSTRAND he showed that there was a connection between the capacity to take up oxygen and the total amount of hemoglobin in the body.

Clinical methods have been described, in particular by NYLIN and WAHLUND in Sweden and JONGBLOED, VAN NIEUWENHUIZEN and VAN GOOR in the Netherlands. BURGER has developed a test suitable for industry.

C. *Physiological functions that can be used to determine physical working capacity*

To a certain extent these published investigations provided a guide to this research. It was clear at the outset that excessive exertion in heart patients had to be avoided, so that working capacities had to be determined as accurately as possible from values well below the maximum ones. These capacities were always defined as percentages of the corresponding capacities in "normal" persons of the same sex, age and bodily build.

Work load and oxygen uptake are closely associated; the working capacity depends on the rate oxygen can be transported from the air to the muscles. A trained athlete has a better capacity to transport oxygen than a normal man, who, in turn, has a better capacity than a disabled man. The capacity for transporting oxygen depends on ventilation, diffusion and circulation, and the oxygen debt is a reflection of this capacity.

The ventilation minute volume and pulse frequency are both good variables to measure, as this can be done accurately during a function test; so also is the oxygen debt at the end of the exercise.

Working capacities of heart patients were compared with those of untrained healthy subjects and having the same sex, age and weight; this was done by measuring their increases in ventilation minute volumes, the work load at a pulse frequency of 170 beats per minute, and the increase in pulse frequency following a given increase in work load.

D. *Important factors in planning the experiments*

An adequate rise in oxygen uptake, and a high enough load on important groups of muscles, can be obtained using a bicycle ergometer, a crank ergometer, or a treadmill.

As already pointed out, a patient must be tested at loads well below the maximum, whilst in any one test on a new patient his maximum is not known. Some investigators therefore carry out a series of tests with increasing loads. This however means either undesirable fatigue for the subject or several sittings. The method described here is one of increasing loads, but it overcomes these difficulties by choosing the increases so that the whole test need not last longer than 12 or 15 minutes. By means of a continually increasing load the patient undergoes a succession of steady states with a gradual change from each one to the next one. It is shown that if the load corresponds to an increase in oxygen uptake of not more than 150 ml per minute, then, following upon a transition to a constant load, the steady state is attained in less than one minute: in other words the oxygen uptake establishes itself at a constant level within a minute.

It is found that for the bicycle ergometer the increase should not be more than 10 Watts per minute, for the crank ergometer not more than 5 Watts per minute, while for the treadmill with a band speed of 1 m per second its gradient should increase by not more than half a degree per minute.

Attempts were made to assess the physical working capacity from differences in efficiency between patients and normals, which seemed reasonable theoretically, but they yielded little in practice owing to the spread in measurements of oxygen uptake. For example the efficiency of heart patients' cycling was not demonstrably different from that of healthy subjects; in both groups it was 22% with a standard deviation of 2.2%.

E. *Measurements and calculations of physiological variables*

This experimental set-up enables us to measure or calculate all components that play a role in transporting oxygen from the air to the muscles.

For *respiration,* the ventilation per minute and the differences in concentration of oxygen and carbon dioxide between outside air and expired air were measured.

For *circulation,* the pulse was measured continuously, and blood pressures and electrocardiograms were taken every minute.

As criteria for determining physical working capacity were used:

1. The *ventilation-capacity-index,* i.e. the increase in ventilation per minute per 10 Watt increase in load (Fig. 5).
   The normal increase amounts to 2.2 l per 10 Watts, and is independent of sex, age and weight. In normal subjects the coefficient of variation of this index was found to be 12.6%.
2. The *worklevel* that can be reached *at pulse frequency 170* appears to be fairly well correlated with the body weight, so that the normal values can be given per kg body weight. For an adult man the value is 3.04 Watts per kg and for an adult woman 2.33 Watts per kg, both at a pulse of 170 per minute. The coefficient of variation, of the workload at pulse frequency 170, is 9.5% in normal subjects.
3. *The pulse-capacity-index* is the increase in pulse frequency per rise of 10 Watts in the load (Fig. 5). Average values are 4.0 for adult men and 5.7 for adult women. Values for various ages between 8 and 60 are also given (Table 3). The coefficient of variation is 8.6% for normal subjects.
4. *The oxygen debt* proves to be proportional to the net oxygen uptake and thus to the load. For the assessment of the physical working capacity the expected and the actual oxygen debt are compared; the spread in normal subjects each repeating the test 8 times is about 27% (see appendix I); this fact makes this criterium less suitable than the others in determining working capacities.
5. *Changes in the electrocardiogram* during exercise tests, which occur particularly in mitralstenotics, may point to insufficient oxygenation of the heart muscles during exertion. Interpreting readings of a direct-recording electrocardiogram during the test provides an indispensable precaution against overstrain.
6. An attempt was made to estimate the *cardiac output* during exertion from other variables measured during a test.

The relationship between the arterio-venous difference in oxygen concentration and the pulse frequency is derived from figures published by Donald, Bishop, Cumming and Wade (1955), Lindhard (1915), Asmussen and Nielsen (1955) and Dexter (1951) (fig. 10), and can be expressed as:

$$\frac{(C_{c'}—C_{\bar{v}})}{(C_{c'}—C_{\bar{v}})_{bas}} = \frac{Pf}{Pf_{bas}}$$

Putting $(C_{c'}—C_{\bar{v}})_{bas}$ equal to 43 ml (Cournand (1941)), then apart from the nervous phase at the beginning of the test, the cardiac output corresponding to each minute of steady state exertion can be obtained approximately from:

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{V}_{O_2}}{\frac{Pf}{Pf_{bas}} \times 43}$$

The basic pulse frequency of a subject can be found by plotting his pulse frequency against oxygen uptake during the test. The basic oxygen uptake can be found in tables (CARPENTER (1939)) and from this, by extrapolating, the basic pulse frequency.

F. *Correlations between the physiological variables for normal and pathological subjects at rest.*

In order to judge the validity of these observations for estimating physical working capacities we have investigated correlations between the different variables obtained from the function test and those from heart catheterization at rest.

From the latter results we calculated the periferal vascular resistance in the lung from the formula:

$$P_R = 80 \frac{(APcm—APpm)}{\dot{Q}} \text{ dynes.sec. cm}^{-5}$$

in which APcm is mean pressure in the pulmonary artery,
APpm mean pressure in lungcapillairies, both in mm Hg.
$\dot{Q}$ is cardiac output in liters per minute, while
80 is a factor allowing for another system of units.

We also endeavoured to estimate the oxygen diffusion capacity of the lung membrane.

This estimate is based on saturation values of blood obtained from the peripheral pulmonary artery with the catheter in the so-called "wedged catheter position". From this the corresponding alveolar oxygen pressure P_A can be read off from the standard dissociation curve.

Saturation values for mixed venous blood are determined using blood from the central pulmonary artery.

The mean capillary oxygen pressure $P_{\bar{C}}$ is obtained graphically from mixed venous saturation and P_A. The oxygen diffusion capacity is then found from the formula:

$$D_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{P_A — P_{\bar{C}}}$$

The various correlations were as follows:

Between the ventilation-capacity-index and the logarithm of the peripheral vascular resistance in the lung in patients with mitral stenosis: —0.90 from 12 men and —0.93 from 16 women (see figs. 11 and 12). Between the log. of the peripheral vascular resistance and the diffusion capacity of the lungs: —0.777 (n = 77) (see fig. 13). From the same data the correlation between the diffusion capacity in ml oxygen per minute per mm Hg and the ventilation-capacity-index is found to be 0.71 (n = 47) (see fig.

14). Between the size of the mitral ostium, calculated from catheterization data on mitralstenotics, and the pulse-capacity-index, the Spearman rank-correlation coefficient was 0.695 ($n = 49$; see fig. 15). The rank correlation coefficient between the pulmonary ostium and the pulse-capacity-index in valvular pulmonary stenosis was 0.896 ($n = 11$) (see fig. 16). We also looked for a correlation between blood pressure and the cross section of arterial constriction in coarctatio aortae, but without success.

The cardiac output during exertion was calculated by the approximate method as described and appeared to be lower for severe mitralstenotics than for healthy subjects. In a case of successful commissurotomy the cardiac output was found to be greater than before the operation and to have attained a normal value (fig. 17).

G. *Conclusions.* These correlations justify using results of function tests to estimate and follow up the physical working capacity of heart patients. The results of our function tests lead to the following conclusions:

The physical working capacity of our patients with mitral stenosis was increased by about 20% after commissurotomy. Before the operation the mean for the group studied was about 46% and afterwards 66% (Tables A and B). Despite this substantial improvement most of them had to be pronounced unfit for heavy work however.

The improvement experienced by the patient himself consists of considerable lessening of dyspnoe, caused by a decrease of the ventilation per minute needed for a given amount of exercise.

In pulmonary stenosis the mean physical working capacities were 63% before operation and after operation in uncomplicated cases of valvular pulmonary stenosis normal values were reached again (table C). Patients with coarctation of the aorta or patent ductus arteriosus were in general only slightly incapacitated; this holds not for most patients with an atrial or ventricular septal defect (Tables D and E).

It must be pointed out however, that a certain degree of selection of patients for the exercise test was certainly present. Patients who were gravely ill have not been submitted to the test. On the other hand patients who were feeling well after operation sometimes did not come back for a control examination.

To sum up, the estimation of working capacity allows a better individual judgment of a patient, and this can be important in a clinic, especially when the grounds for an operation are doubtful, clinically or hemodynamically. They are also useful in assessing the results of a treatment. Both for operated patients and for chronic cases (actual or suspected), function tests help to give reliable advice on how to place them on their return to ordinary life.

LITERATUUR

Asmussen, E., Nielsen, M.,
Physiol. Rev. 35 : 778 (1955)

Åstrand, P. O.,
Experimental studies of physical working capacity in relation to sex and age.
Copenhagen 1952

Åstrand, P. O., Ryhming, I.,
J. Applied Physiol. 7 : 218 (1954)

Åstrand, I.,
Ergonomics 1 : 129 (1958)

Bates, D. V., Boucot, N. G., Dormer, A. E.,
J. Physiol. 129 : 237 (1955)

Bekkering, D. H.,
T. N. O. Nieuws 11 : 468 (1956)

Bink, B., Bonjer, F. H.,
Ned. Tijdschr. v. Gen. 99 : 2177 (1955)

Bohr, C.,
Scand. Arch. f. Physiol. 22 : 221 (1909)

Bonjer, F. H.,
Ned. Tijdschr. v. Gen. 101 : 792 (1958)

Bonjer, F. H.,
Acta Phys. et Pharm. Neerl. 4 : 69 (1955) 5 : 235 (1956)

Bonjer, F. H.,
Tijdschr. v. Soc. Geneesk. 8 : 32 (1954) 10 : 266 (1956)

Burger, G. C. E., Harten, G. A.,
Ned. Tijdschr. v. Gen. 101 : 946 (1957)

Carpenter, T. M.,
Tables, factors and formulas for computing respiratory exchange.
Carnegie Inst. Wash. Pub. 1939

Cournand, A., Ranges, H. A.,
Proc. Soc. Exper. Biol. and Med. 46 : 462 (1941)

Dejours, P., Labrousse, J., Teillac, A.,
J. de Physiol. 48 : 484 (1956)

Deth, R. M. van,
Proefschrift Leiden (1956)

Dexter, L., Whittenberger, J. L., Haynes, F. W., Goodale, W. T., Gorlin, R., Sawyer, C. G.,
J. Applied Physiol. 3 : 439 (1951)

Döbeln, W. von,
Acta Physiol. Scand. Suppl. 126 (1956)

Donald, K. W., Renzetti, A., Riley, R. L., Cournand, A.,
J. Applied Physiol. 4 : 497 (1952)

Donald, K. W., Bishop, J. M., Cumming, G., Wade, O. L.,
Clin. Science 14 : 37 (1955)

Fick, A.,
Sitzber. Phys. med. Gesellsch. Wurzb. 16 (1870)

Filley, G. F., Gregoire, F., Wright, G. W.,
J. Clin. Invest. 33 : 1128 (1954)
Gorlin, R., Gorlin, S. G.,
Am. Heart J. 41 : 1 (1951)
Herrington, L. P.,
Methods in Med. Research 3 : 144 (1950)
Jongbloed, J., Nieuwenhuizen, C. L. C. van, Goor, H. van,
Ned. Tijdschr. v. Gen. 93 : 3541 (1949)
Jongbloed, J., Nieuwenhuizen, C. L. C. van, Goor, H. van,
Circulation 15 : 54 (1957)
Krogh, A.,
Skand. Arch. f. Physiol. 30 : 375 (1913)
Lanooy, C., Bonjer, F. H.,
J. Applied Physiol. 9 : 499 (1956)
Lehmann, G.,
Praktische Arbeitsphysiologie. Thieme. Stuttgart 1953 : 88
Lilly, J. C.,
Methods in Medical Research 2 : 113 (1950)
Lindhard, J.,
Pflügers arch. ges. Physiol. 161 : 233 (1915)
Müller, E. A., Reeh, J. J.,
Arbeitsphysiologie 14 : 137 (1950)
Müller, E. A.,
Arbeitsphysiologie 14 : 271 (1950)
Müller, E. A.,
Radmarkt 4 : 14 (1952)
Noyons, A. K. M.,
Ann. de Physiol. 13 : 909 (1937)
Nylin, G.,
Acta Med. Scand. Suppl. 52 (1933) Suppl. 78 : 64 (1936) Suppl. 93 (1938)
Suppl. 266 (1952)
Pappenheimer, J.,
Federation Proceed. 9 : 602 (1950)
Pauling, L., Wood, R. E., Sturdivant, J. H.,
J. Am. Chem. Soc. 68: 795 (1945)
Rahn, H., Otis, A. B.,
J. Applied Physiol. 1 : 717 (1949)
Redfearn, J. W. T.,
J. Applied Physiol. 7 : 109 (1954)
Riley, R. L., Cournand, A.,
J. Applied Physiol. 1 : 825 (1949)
Robinson, S.,
Arbeitsphysiologie 10 : 251 (1938)
Rodrigo, F. A.,
Am. Heart J. 45 : 1 (1953)
Sjöstrand, T.,
Acta Med. Scand. 2 : 231 (1941) Suppl. 196 : 687 (1947)
Szakall, A.,
Arbeitsphysiologie 13 : 9 (1944)
Visser, B. F.,
Proefschrift Utrecht (1957)
Vonk Jr., J. Th. Ch.,
Ned. Tijdschr. v. Gen. 97 : 3350 (1953)

Vonk Jr., J. Th. Ch.,
Tweede Europees Cardiologen Congres, Stockholm (1953)
Vuylsteek, K.,
Thesis Gent (1955)
Wahlund, H.,
Acta Med. Scand. Suppl. 215 (1948)
Wijn, J. F. de,
In bewerking: Lengte en gewicht van een tot vijfentwintig jaar in Nederland. Verh. Ned. Inst. v. Prev. Gen.

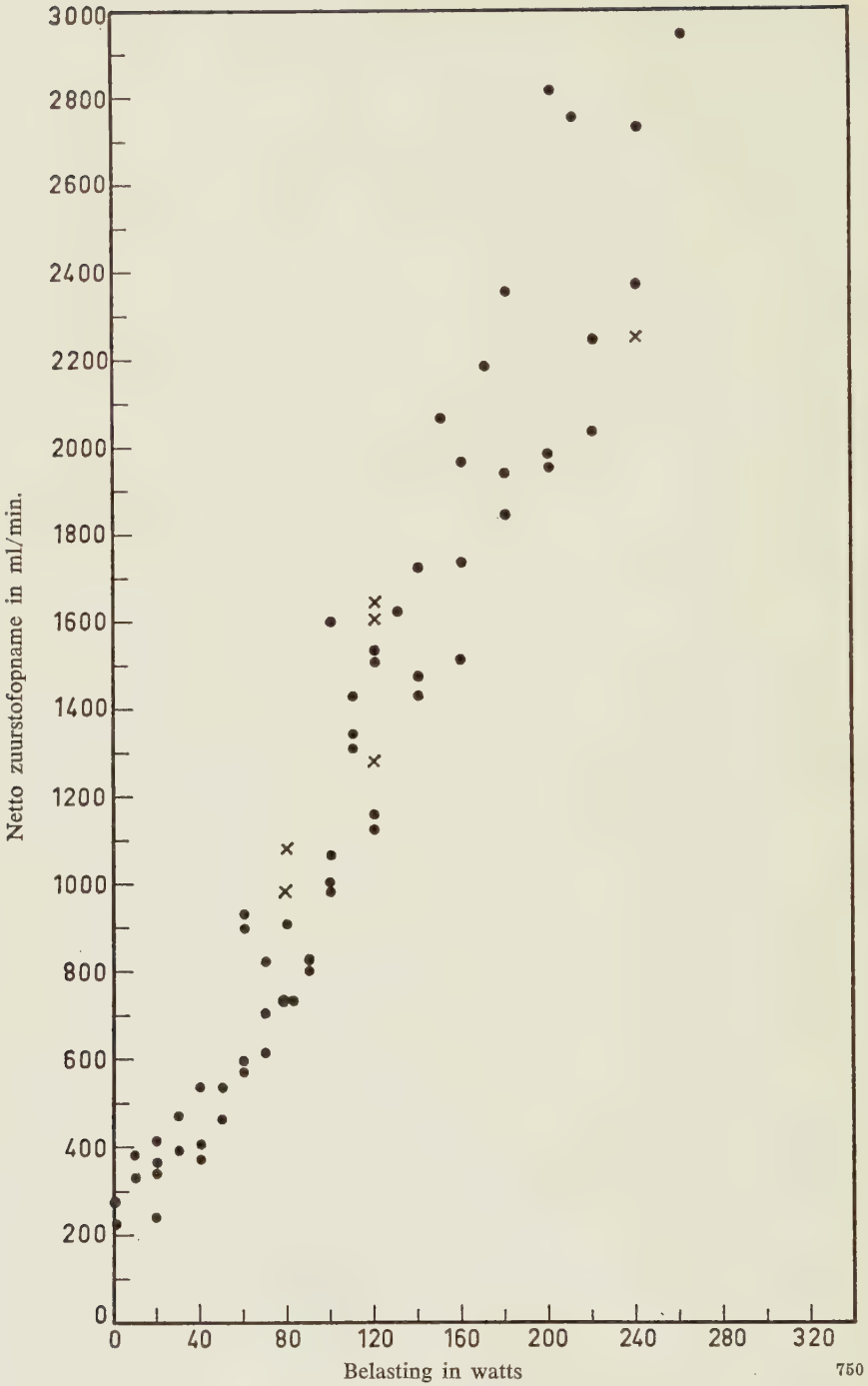


Fig. 18 Relatie van de belasting en de netto zuurstofopname.

• Zuurstofopname tijdens steady state (getallen uit app. II).

× Gemiddelde zuurstofopname van zes proeven met opklimmende belasting bij dezelfde proefpersoon (getallen uit appendix I).

Appendix I

Reeks van waarnemingen bij zes proefpersonen, die ieder de functieproef achtmaal verrichtten

De uitkomsten van waarnemingen bij zes gezonde ongetrainde proefpersonen, die de functieproef op verschillende dagen ongeveer achtmaal verrichtten, zijn verzameld in zes tabellen.

Boven iedere tabel staan de gegevens van de betreffende proefpersoon: geslacht, leeftijd, lengte en gewicht. Iedere tabel bestaat uit twaalf kolommen, gerangschikt volgens datum:

1. het aantal watt, dat als hoogste bereikt werd na een opklimmende belasting, waarvan de toename 10 watt per minuut bedroeg;
2. het aantal milliliter zuurstofopname per minuut stilzittend op de fietsergometer;
3. het aantal milliliter zuurstofopname per minuut in de laatste minuut van de arbeid onder aftrek van de zitstofwisseling (kolom 2), de zogenaamde netto zuurstofopname per minuut (zie fig. 18). Deze waarde werd nauwkeurig vastgesteld door de regressielijn te berekenen door de zuurstofopnamewaarden van iedere minuut van de proef;
4. de zuurstofschuld in milliliters over 10 minuten direct na het beëindigen van de arbeid;
5. de uit figuur 9 te verwachten zuurstofschuld;
6. de verhouding van de verwachte en de werkelijk gevonden zuurstofschuld in procenten;
7. het aantal slagen toename van de polsfrequentie per toename van de belasting met 10 watt, de zogenaamde pols-prestatie-index;
8. de procentuele waarde van de toename van de polsfrequentie per 10 watt toename van de belasting (P.P.I.) ten opzichte van de normale waarde voor deze toename, namelijk bij de volwassen man 4,01; bij de volwassen vrouw 5,74;
9. het aantal liters toename van het ademminutenvolume per toename van de belasting met 10 watt;
10. de procentuele waarde van deze toename van het ademminutenvolume ten opzichte van de normale waarde van deze toename, namelijk 2,2 liter per 10 watt toename van de belasting;
11. de door extrapolatie verkregen waarde van het aantal watt, dat verricht zou kunnen worden bij polsfrequentie 170 slagen per minuut;
12. de procentuele waarde van de arbeidsbelasting bij polsfrequentie 170 ten opzichte van de normale waarde, die bij de volwassen man 3,04 en bij de volwassen vrouw 2,33 watt per kg lichaamsgewicht bedraagt.

Onder iedere tabel is de berekende waarde weergegeven voor de gemiddelde waarde (m), de standaarddeviatie (s) en de variatiecoëfficiënt (cv).

Voor de betekenis van m, s en cv raadplege men de statistical variables op de laatste bladzijde.

PROEFPERSOON I

T.P., vrouw, 24 jaar, 1.67 m, 58.5 kg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstofschuld	Prc.	P.P.I.		V.P.I.		Arb. 170	
							getal	prc.	getal	prc.	getal	prc.
28 - 7 - '54							5.93	97	2.09	105	166W	122
29 - 7 - '54							5.90	97	1.53	138	166W	122
30 - 7 - '54	80	335	956	663	700	106	5.99	104	2.02	109	175W	123
2 - 8 - '54	80	313	900	817	700	86	5.96	96	1.67	131	152W	112
3 - 8 - '54	80	324	857	966	700	72	5.37	107	1.81	121	178W	130
4 - 8 - '54	80	329	938	567	700	123	5.28	109	2.15	102	172W	126
10 - 9 - '54	80	381	1171	894	700	78	5.28	109	2.00	110	190W	139
17 - 9 - '54	80	394	1119	734	700	95	4.42	130	2.20	100	198W	145
	m =	346	990	774		93	5.45	106	1.93	114	175	129
	s =	33.2	125.6	148.3			0.515		0.239		26.4	
	cv =	9.6%	12.7%	19.2%			9.1%		12.4%		15.1%	

PROEFPERSOON II

C.V., vrouw, 23 jaar, 1.74 m, 55.0 kg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstofschuld	Prc.	P.P.I.		V.P.I.		Arb. 170	
							getal	prc.	getal	prc.	getal	prc.
28 - 7 - '54	80						6.94	83	2.52	87	127W	99
29 - 7 - '54	80						7.68	74	2.09	105	112W	87
30 - 7 - '54	80	304	935	839	700	83	5.81	99	2.50	88	130W	101
31 - 7 - '54	80	308	1066	577	700	121	6.08	94	2.30	96	140W	109
3 - 8 - '54	80	241	1036	655	700	107	6.12	93	2.52	87	154W	120
4 - 8 - '54	80	269	890	1446	700	48	6.49	88	2.26	97	145W	113
6 - 9 - '54	80	322	1327	1017	700	69	6.79	85	3.13	70	143W	112
9 - 9 - '54	80	255	1260	650	700	108			2.47	89	180W	140
	m =	283	1086	864		89	6.559	87	2.476	89	141	110
	s =	32.7	174.1	327			0.679		0.151		20.2	
	cv =	11.6%	16.0%	37.8%			10.4%		12.2%		14.3%	

PROEFPERSOON III

F.P., man, 22 jaar, 1.69 m, 69 kg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstofschuld	Prc.	P.P.I.		V.P.I.		Arb. 170	
							getal	prc.	getal	prc.	getal	prc.
28 - 8 - '54	120						4.06	99	2.09	105	212W	101
30 - 8I - '54	120	335	1658	1458	1080	74	3.74	107	1.85	119	230W	110
30 - 8II - '54	120	353	1674	1879	1080	57	3.66	110	1.69	130	243W	116
6 - 9I - '54	120						4.62	87	1.85	119	200W	95
6 - 9II - '54	120	412	1701	1529	1080	71	4.21	95	1.88	117	232W	111
10 - 9 - '54	120	385	1477	1380	1080	78	3.62	111	1.65	133	250W	119
13 - 9 - '54	120	401	1907	1282	1080	84	4.40	92	2.05	107	218W	104
15 - 9 - '54	120	417	1818	1108	1080	97	4.35	92	2.10	105	218W	104
17 - 9 - '54	120	355	1722	2556	1080	42	4.88	82	2.24	98	204W	97
18 - 9 - '54	120	371	1965	1771	1080	61	4.14	97	2.28	96	222W	106
	m =	379	1729	1620		71	4.168	96	1.968	112	222.9	106
	s =	30	217	453			0.4155		0.2192		16.06	
	cv =	7.9%	12.6%	27.9%			10.0%		11.1%		7.2%	

PROEFPERSOON IV

J.W.S., man, 29 jaar, 1.82 m, 83.3 kg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstofschuld	Prc.	P.P.I.		V.P.I.		Arb. 170	
							getal	prc.	getal	prc.	getal	prc.
28 - 8 - '54	120	390	1561	1421	1080	76	3.55	113	2.49	88	226W	90
30 - 8 - '54	120	442	1734	1184	1080	91			2.59	85		
6 - 9 - '54	120	440	1760	1373	1080	79	3.24	124	2.00	110	230W	92
8 - 9 - '54	120	461	1776	1195	1080	90	3.41	117	2.18	101	205W	82
9 - 9 - '54	120	449	1677	1068	1080	101	3.27	123	2.00	110	250W	100
11 - 9 - '54	120	428	1869	870	1080	124	3.71	108	1.84	119	225W	90
13 - 9 - '54	120	466	1843	1245	1080	87	3.12	128	2.10	105	222W	89
15 - 9 - '54	120	425	1606	778	1080	139	3.71	108	1.61	137	214W	86
16 - 9 - '54	120	417	1616	1737	1080	62	3.43	117	1.78	123	217W	87
	m =	435	1716	1208		94	3.43	117	1.932	114	223	89
	s =	21	108	290			0.217		0.1978		13.29	
	cv =	4.8%	6.3%	24.8%			6.3%		10.2%		5.9%	

PROEFPERSOON V

B.B., man, 38 jaar, 1.82 m, 77 kg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstofschuld	Prc.	P.P.I.		V.P.I.		Arb. 170	
							getal	prc.	getal	prc.	getal	prc.
28 - 7 - '54	120						4.05	99	2.25	98	218W	93
29 - 7 - '54	120						4.05	99	1.94	113	240W	103
30 - 7I - '54	120						4.18	96	2.52	88	241W	103
30 - 7II - '54	120	523	1452	1464	1080	74	4.23	95	2.88	77	258W	111
31 - 7 - '54	120	436	1338	1319	1080	82	3.88	103	2.40	92	265W	113
2 - 8 - '54	120	446	1311	715	1080	151	3.62	111	1.80	122	285W	118
3 - 8 - '54	120	379	1248	1831	1080	59	3.52	114	2.24	99	272W	117
4 - 8 - '54	120	505	1366	902	1080	120	3.81	105	2.40	92	240W	103
5 - 8 - '54	120	390	1036	1005	1080	107	3.06	131	2.70	82		
	m =	446	1292	1218		99	3.82	105	2.346	94	260	111
	s =	58.6	142	391			0.373		0.342		29.9	
	cv =	13.1%	11.0%	32.1%			9.8%		14.4%		11.5%	

PROEFPERSOON VI

W.V., man, 26 jaar, 189 cm, 84 kg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstofschuld	Prc.	P.P.I.		V.P.I.		Arb. 170	
							getal	prc.	getal	prc.	getal	prc.
31 - 1 - '55	240	311	3233	2811	3260	116	3.87	104	2.14	103	284W	111
4 - 2 - '55	240	419	2416	1837	3260	177	4.56	88	2.45	90	256W	100
25 - 2 - '55	240	399	2173	2351	3260	141	3.78	106	1.77	124	260W	102
15 - 4 - '55	240	440	2518	2160	3260	151	4.05	99	2.39	92	265W	104
2 - 5I - '55	240	308	2115	1941	3260	168	4.28	94	1.91	115	260W	102
2 - 5II - '55	240	336	2021	1415	3260	230	4.19	96	1.76	125	265W	104
6 - 5 - '55	240	309	1837	1495	3260	218	4.15	97	2.04	107	262W	102
11 - 5 - '55	240	290	2009	1934	3260	169	3.93	102	1.92	116	258W	100
12 - 5 - '55	240	342	1942	1670	3260	195	3.81	105	1.75	125	262W	103
	m =	350	2252	1957		174	4.07	99	1.90	111	264	103
	s =	55.2	428	423			0.25		0.29		8.2	
	cv =	15.8%	19.0%	21.6%			6.1%		15.2%		3.1%	

Opm.

Deze tabel heeft betrekking op een bijzonder goed getrainde proefpersoon en zijn zuurstofopname bij een arbeidsbelasting van 240 watt is relatief laag (zie figuur 18, het punt × bij 240 watt). Dat ook zijn zuurstofschuld buitengewoon laag blijft blijkt uit het hoge percentage in kolom 6. Dit wordt veroorzaakt doordat als normale waarde voor de zuurstofschuld 3260 ml is aangehouden, terwijl de werkelijke zuurstofschuld van deze proefpersoon steeds lager is dan afgelezen wordt uit de in figuur 9 getekende curve.

Appendix II

Reeks van waarnemingen bij vier proefpersonen, die een constante arbeid op de fietsergometer verrichtten met telkens hogere belasting

De uitkomsten van waarnemingen aan vier normale proefpersonen (proefpersonen I, II, V en VI uit de reeks van appendix I), die gebruikt zijn voor het samentellen van de figuren 9 en 18, worden, gerangschikt volgens datum, in vijf kolommen weergegeven:

1. het aantal watt belasting op de fietsergometer gedurende de tien minuten arbeid;
2. het aantal ml zuurstofopname per minuut stilzittend op de fietsergometer (alleen proefpersoon V);
3. het aantal ml zuurstofopname per minuut boven het aantal ml zuurstofopname stilzittend op de fietsergometer, de zogenaamde netto zuurstofopname per minuut gemiddeld over de laatste vijf minuten van de arbeid (steady state) (zie figuur 18);
4. het aantal ml zuurstofschuld over 10 minuten direct na het beëindigen van de arbeid;
5. de te verwachten zuurstofschuld (zie figuur 9).

Proefpersoon I

T.P.

	1	3	4	5
Datum	Watt	Netto VO_2 l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstof-schuld
8 - 4 - '54	0	226	320	180
10 - 4 - '54	10	387	294	220
23 - 2 - '54	20	362	304	280
24 - 2 - '54	30	469	385	340
10 - 3 - '54	40	379	368	400
10 - 3 - '54	50	467	352	470
12 - 3 - '54	60	582	439	540
12 - 3 - '54	70	705	531	620
15 - 3 - '54	80	735	557	700
19 - 3 - '54	90	830	609	790
23 - 3 - '54	100	998	976	880
9 - 4 - '54	110	1306	1050	980
12 - 4 - '54	120	1506	1237	1080

PROEFPERSOON II

C.V.

	1	3	4	5
Datum	Watt	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstof-schuld
10 - 4 - '54	0	277	237	180
12 - 4 - '54	10	336	246	220
7 - 4 - '54	20	348	358	280
24 - 2 - '54	30	397	394	340
10 - 3 - '54	40	407	375	400
10 - 3 - '54	50	539	449	470
10 - 3 - '54	60	594	430	540
12 - 3 - '54	70	614	478	620
15 - 3 - '54	80	732	576	700
19 - 3 - '54	90	814	654	790
23 - 3 - '54	100	1000	840	880
9 - 4 - '54	110	1342	1132	980

PROEFPERSOON VI

W.V.

	1	3	4	5
Datum	Watt	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstof-schuld
19 - 1 - '54	20	418	366	280
22 - 1 - '54	40	536	300	400
22 - 1 - '54	60	892	650	540
17 - 2 - '54	80	907	744	700
29 - 1 - '54	120	1152	944	1080
28 - 1 - '54	140	1477	1271	1320
16 - 2 - '54	160	1518	1342	1570
29 - 1 - '54	180	1846	1708	1880
30 - 1 - '54	200	1956	1701	2260
5 - 2 - '54	220	2031	1818	2720
5 - 2 - '54	240	2372	2721	3260
9 - 2 - '54	260	2938	3042	3880
12 - 2 - '54	280	3245	6111	—

PROEFPERSOON V

B.B.

	1	2	3	4	5
Datum	Watt	Rust-stofw.	Netto VO_2l.m.	Zuurst. schuld	Verwachte zuurstof-schuld
19 - 1 - '54	20	273	237	180	280
22 - 1 - '54	40	345	537	458	400
22 - 1 - '54	60	319	936	589	540
23 - 12 - '53	70	306	821	594	620
26 - 1 - '54	100	284	1067	814	880
26 - 1 - '54	110	361	1433	1011	980
27 - 1 - '54	120	327	1122	896	1080
13 - 11 - '53	120	278	1537	1196	1080
13 - 11 - '53	130	302	1625	1210	1200
14 - 11 - '53	140	276	1729	1234	1320
27 - 1 - '53	140	363	1432	1340	1320
16 - 11 - '53	150	264	2070	1720	1440
11 - 2 - '54	160	291	1737	1710	1570
23 - 11 - '53	160	307	1969	1988	1570
23 - 11 - '53	170	297	2186	1936	1720
25 - 11 - '53	180	283	2352	2030	1880
29 - 1 - '54	180	344	1942	2118	1880
25 - 11 - '53	190	345	3075	2768	2060
26 - 11 - '53	200	328	2813	3236	2260
30 - 1 - '54	200	380	1985	1947	2260
26 - 11 - '53	210	307	2755	2849	2480
5 - 2 - '54	220	310	2247	2675	2720
5 - 2 - '54	240	357	2733	3645	3260

Appendix III

Berekeningsmethode voor de zuurstofdiffusiecapaciteit der longen

De zuurstofdiffusiecapaciteit der longen (Bohr (1909)) is de zuurstofopname per minuut ($\dot{V}_{O_2}$) per mm Hg drukverschil tussen de alveolaire zuurstofspanning (P_A) en de gemiddelde zuurstofspanning in de alveolaire capillairen ($P_{\bar{C}}$). In formule gebracht is de diffusiecapaciteit

$$D_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{P_A - P_{\bar{C}}}$$

a. *Berekening van de zuurstofdiffusiecapaciteit uit de catheterisatiegegevens in rust*

In hoofdstuk V werden correlaties genoemd tussen de ventilatie-prestatie-index, de perifere longvaatweerstand en de diffusiecapaciteit bij patiënten met mitraalstenose. Hier zal worden uiteengezet op welke wijze de diffusiecapaciteit in deze gevallen werd berekend uit gegevens van de hartcatherisatie. De $\dot{V}_{O_2}$ werd bepaald met Douglasbags en Scholander gasanalyse. De alveolaire zuurstofspanning P_A kon slechts met behulp van een kunstgreep worden vastgesteld en wel door het opschuiven van een hartcatheter in de vertakkingen van de arteria pulmonalis totdat deze ingeklemd raakte (wedged catheter position). Bloedmonsters uit de catheter in deze positie kunnen worden geacht te zijn getonometreerd met alveolaire lucht, immers het bloed achter de ingeklemde catheterpunt heeft gedurende enige tijd stilgestaan. Uit de zuurstofverzadiging van het aldus verkregen monster kan de partiële zuurstofspanning worden teruggevonden en daarmede de partiële zuurstofspanning in alveolaire lucht worden benaderd.

Op welke wijze de gemiddelde zuurstofspanning in de alveolaire capillairen kan worden bepaald uit P_A en $S_{\bar{v}}$, de verzadiging van gemengd veneus bloed wordt onder b beschreven. $S_{\bar{v}}$ wordt rechtstreeks gemeten in een monster bloed, dat door middel van een hartcatheter uit de arteria pulmonalis centralis wordt genomen.

b. *Grafische methode*

De gemiddelde waarde van de zuurstofspanning in de alveolaire capillairen ($P_{\bar{C}}$) ligt tussen de zuurstofspanning van het instromend gemengd veneuze bloed ($P_{\bar{v}}$) en het uitstromende eindcapillaire bloed ($P_{c'}$).

Met de afhankelijkheid van $P_{\bar{C}}$ van $P_{\bar{v}}$ en P_A voor ogen werd een grafische methode ontwikkeld, die als volgt kan worden uitgevoerd:

De relatie tussen de zuurstofsaturatie en de zuurstofspanning van het bloed wordt weergegeven door de dissociatiekromme. In figuur 19 is de standaard-dissociatiecurve volgens de metingen van Dill (Riley en Cournand (1949)) weergegeven. De afstand van 0 tot 100% saturatie is gelijk gekozen aan de afstand 0 tot 100 mm Hg zuurstofspanning. Dit is een strikte voorwaarde voor het uitvoeren van deze grafische methode.

Door P_A trekt men een loodlijn evenwijdig aan de ordinaat en door $S_{\bar{v}}$ een

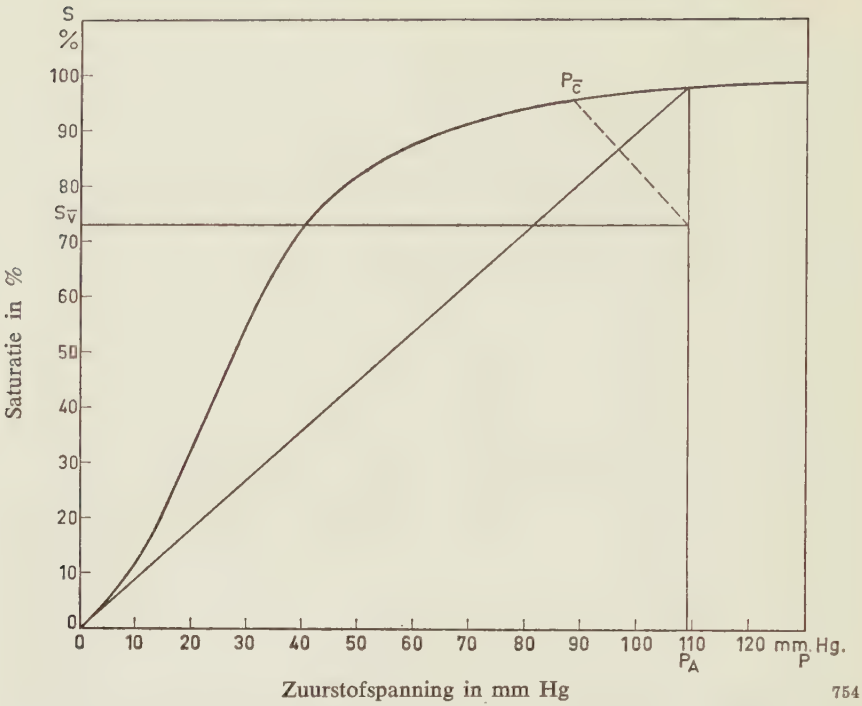


Fig. 19 Grafische methode voor het vinden van de gemiddelde capillaire zuurstofspanning.

lijn evenwijdig aan de abscis. Door uit het snijpunt een loodlijn neer te laten op een lijn tussen P_A op de dissociatiekromme en het nulpunt en deze door te trekken tot aan de dissociatiekromme vindt men $P_{\bar{c}}$. De aldus gevonden $P_{\bar{c}}$ voldoet dan aan de gestelde voorwaarden. $P_{\bar{c}}$, en ook P_A—$P_{\bar{c}}$ direct, kan men op de grafiek aflezen. De ontwikkelde grafische methode werd getoetst op gegevens van Donald, Renzetti, Riley en Cournand (1952) en bleek een goede overeenstemming te geven.

c. *Berekening van de zuurstofdiffusiecapaciteit uit de gegevens van de functieproef bij gezonde proefpersonen*

Het is ook mogelijk de diffusiecapaciteit te schatten uitgaande van de gegevens van de functieproef.

De waarde van de alveolaire zuurstofspanning P_A is bij benadering vast te stellen uit de end tidal air. De zuurstoffractie, die met behulp van de Pauling zuurstofspanningsmeter wordt vastgesteld in end tidal air, komt bij benadering overeen met de gemiddelde zuurstoffractie in de alveolaire lucht (fout naar bepalingen van Filley (1954)) ongeveer 5%.

$S_{\bar{v}}$ moet dan berekend worden uit de polsfrequentie en de zuurstofopname, zoals in hoofdstuk IV B werd beschreven (relatie polsfrequentie en arterioveneus verschil in zuurstofgehalte, zie figuur 10).

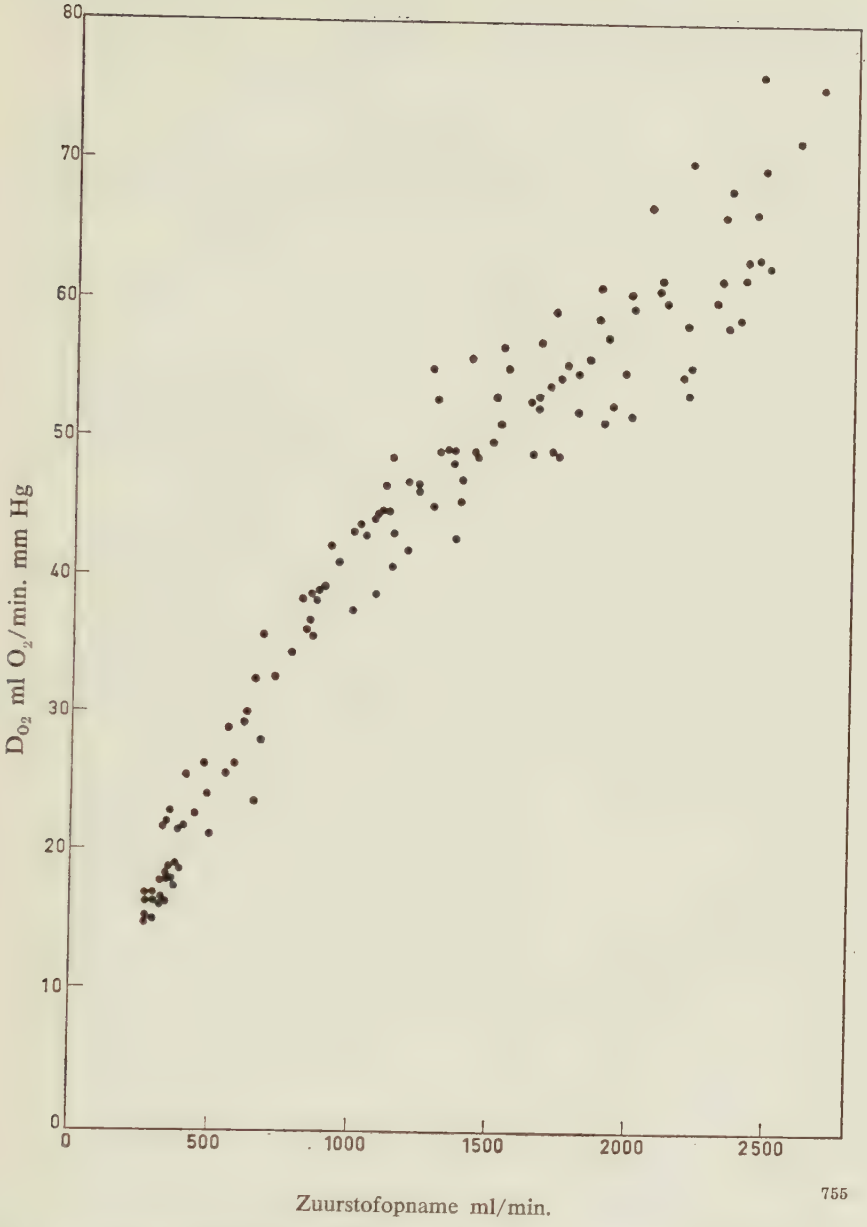


Fig. 20 Relatie zuurstofopname en diffusiecapaciteit bij een gezonde proefpersoon.

Door de polsfrequentie uit te zetten tegen de zuurstofopname per minuut en te extrapoleren naar de basale zuurstofopname kan men de basale polsfrequentie vinden.

$$C_c,—C_{\bar{v}} = \frac{Pf}{Pf_{bas}} \times 4{,}3 \text{ vol. \% } O_2$$

Daar het zuurstofgehalte van bloed gelijk is aan de zuurstofcapaciteit maal de verzadiging is $S_c,—S_{\bar{v}}$ te vinden uit $C_c,—C_{\bar{v}}$, indien men het haemoglobinegehalte en daarmede de zuurstofcapaciteit van het bloed kent. Wordt S_c, op de dissociatiecurve afgelezen uit P_A dan is hiermee $S_{\bar{v}}$ bekend.

Wanneer deze methode wordt toegepast gedurende de functieproef met toenemende belasting op de fietsergometer, kan de relatie tussen D_{O_2} en $\dot{V}_{O_2}$ verkregen worden voor alle waarden van $\dot{V}_{O_2}$.

De curve in figuur 20 werd verkregen uit acht experimenten bij dezelfde middelmatig getrainde proefpersoon. D_{O_2} is op de beschreven wijze berekend en uitgezet tegen $\dot{V}_{O_2}$. De proefpersoon deed arbeid op de fietsergometer, waarbij de belasting continu met 10 watt per minuut toenam. Elke proef werd verricht van 0 tot 240 watt. De standaarddeviatie van de acht verschillende D_{O_2} waarden voor iedere minuut is 9,3% van het gemiddelde.

Het voordeel van deze methode is dat men een curve verkrijgt, waarin D_{O_2} tegen $\dot{V}_{O_2}$ is uitgezet. Zulk een curve kan door middel van één enkele functieproef met oplopende belasting worden bepaald, terwijl bij andere methoden hiertoe een groot aantal proeven nodig zou zijn.

Dr. D. V. Bates in het St. Bartholomew Hospital, Londen, maakte het mogelijk deze methode te vergelijken met de CO-methode (Bates, Boucot, Dormer (1955)). In de onderstaande tabel werden de waarden voor D_{CO} zoals die door Dr. Bates werden gemeten, vergeleken met de waarden voor D_{O_2} bij dezelfde zuurstofopname, bij proefpersoon B.B.:

$\dot{V}_{O_2}$	D_{CO}	$D_{CO} \times 1{,}23$	D_{O_2}
rust	12,8	15,7	16,1
1,25 l/min.	26,2	32,2	49,0
2,08 l/min.	56,5	69,5	66,6
1,23 is de factor uit $D_{O_2} = D_{CO} \times 1{,}23$			

STATISTICAL VARIABLES

n = number

m = mean value $\quad m = \frac{\Sigma x}{n}$

s = standard deviation $\quad s = \sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$

cv = coëfficiënt of variation $\quad cv = \frac{s}{m} \times 100\%$

SYMBOLEN

De symbolen gebruikt in deze verhandeling zijn grotendeels ontleend aan de internationale nomenclatuur (PAPPENHEIMER (1950)) en worden onvertaald weergegeven:

De beide eerste worden als eigen symbolen bovendien ingevoerd:

Pf = Polsfrequentie
S = Slagvolume
V = Gas volume in general
$\dot{V}$ = Gas volume per unit of time
P = Gas pressure in general
F = Fractional concentration in dry gas phase
$\dot{Q}$ = Volume flow of blood
C = Concentration in blood phase
D = Diffusing capacity (volume of gas diffusing per unit time per unit pressure difference)

SYMBOLS FOR GAS PHASE (small capital letters immediately following the general variables)

I = Inspired gas
E = Expired gas
A = Alveolar gas

SYMBOLS FOR BLOOD PHASE (lower case letters immediately following the general variables)

a = Arterial
c = Alveolar capillary blood at any point along the capillary
v = Venous

SPECIAL SYMBOLS (superscripts immediately following the general variables)

' = Prime indicates blood or gas leaving the alveolus, in general
¯ = Dash above any symbol indicates a mean value

EXAMPLES

$_{c'}$ = blood leaving the alveolar capillary
$_{\bar{v}}$ = mixed venous blood
$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_A (F_I — F_A) = \dot{Q}_c (C_{c'} — C_{\bar{v}})$
$P_{A_{O_2}} — P_{\bar{C}_{O_2}}$ = mean oxygen partial pressure gradient between alveolar gas and alveolar capillary blood.
$\triangle_{O_2} = F_I — F_E$ $\triangle_{O_2}$ end tidal $= F_I — F_A$